

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2010

Bogdan Fukala

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Vliv elektrické vozby na napájecí soustavu
Influence of Electric Railways on Power Supply System

2010

Bogdan Fukala

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Bogdan Fukala**

Studijní program: N2649 Elektrotechnika

Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika

Téma: **Vliv elektrické vozby na napájecí soustavu**
Influence of Electric Railways on Power Supply System

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
 2. Nepříznivé vlivy elektrické vozby na napájecí soustavu
 3. Měření ve vybrané transformovně
 4. Vyhodnocení měření
 5. Závěr
1. Introduction
 2. Disturbing Influences of Electric Railways on the Power Supply System
 3. Measurement in a Selected Traction Transformer Substation
 4. Evaluation of the Measurement
 5. Conclusion

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] Paleček, J.: Napájení jednofázové vozby z hlediska elektromagnetické kompatibility, VŠB-TU Ostrava 2001, ISBN 80-78-791-0
- [2] Biesenack, H.; Hofmann, G. u. a.: Energieversorgung elektrischer Bahnen, B.G. Taubner Verlag Wiesbaden 2006, ISBN 13 978-3-519-06249-3
- [3] Rusek, S.: Teoretická elektroenergetika, VŠB-TU Ostrava 1999
- [4] ČSN EN 5 160 Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z distribuční sítě (platná od 2000) a související normy a předpisy

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Josef Paleček, CSc.**

Datum zadání: 20.11.2009

Datum odevzdání: 07.05.2010


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry




prof. Ing. Ivo Vondrák, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně.

Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 20. dubna 2010

.....
Bogdan Fukala

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval panu prof. Ing. Josefu Palečkovi, CSc. a panu Ing. Václavu Kolářovi, Ph.D. za cenné rady, které mi poskytli během vypracovávání této práce.

Bogdan Fukala

Abstrakt

Tato diplomová práce pojednává o nepříznivých vlivech, které generuje provozování elektrické trakce do napájecí distribuční sítě.

První část popisuje vznik rozdílných trakčních proudových soustav a jejich charakteristiky. Druhá část přináší přehled nepříznivých vlivů a teoretický rozbor dvou z nich – proudové a napět'ové nesymetrie a harmonického zkreslení. Třetí a čtvrtá část se věnuje praktickému měření ve vybrané trakční transformátorové napájecí stanici a vyhodnocení naměřených dat.

Klíčová slova

napájecí soustava, trakční proudová soustava, nesymetrie napětí, harmonické zkreslení, trakční (transformátorová) napájecí stanice, trakční vedení, filtračně-kompenzační zařízení.

Abstract

This thesis treats of disturbing influences, which generates the exercise of the electric traction to the power distribution network.

The first part describes the creation of different traction current systems and their characteristics. The second part brings an overview of disturbing influences and theoretical analysis two of them – current and voltage unbalance and harmonic distortion. The third and fourth part attends to practical measurements in a selected traction transformer substation and evaluation of measured data.

Keywords

power supply system, traction current system, voltage unbalance, harmonic distortion, traction (transformer) substation, contact line, filtering-compensating device.

Seznam použitých symbolů a zkratek

AC	alternating current – střídavý proud
ČD	České dráhy
ČSD	Československé státní dráhy
DC	direct current – stejnosměrný proud
DFT	diskrétní Fourierova transformace
DS	distribuční soustava
EMC	electromagnetic compatibility – elektromagnetická kompatibilita
FKZ	filtračně-kompenzační zařízení
HDO	hromadné dálkové ovládání
Hz	Hertz
kV	kilovolt
mH	milihenry
MW	megawatt
nn	nízké napětí
PPDS	Pravidla provozování distribučních soustav
PS	přenosová soustava
TNS	trakční napájecí stanice
vn	vysoké napětí
vvn	velmi vysoké napětí

Obsah

1	Úvod	8
1.1	Trakční proudové soustavy	9
1.1.1	Vznik trakčních proudových soustav v Evropě.....	9
1.1.2	Vývoj trakčních proudových soustav v České (Československé) republice	11
1.1.3	Charakteristiky trakčních proudových soustav	12
1.1.4	Styk odlišných trakčních proudových soustav	16
1.2	Trakční měničky	17
1.3	Trakční transformovny.....	19
1.4	Hnací vozidla elektrické trakce	20
2	Nepříznivé vlivy elektrické vozby na napájecí soustavu.....	22
2.1	Přehled vlivů	22
2.2	Proudová a napěťová nesymetrie.....	24
2.2.1	Teoretický rozbor nesymetrie, její příčiny a důsledky	24
2.2.2	Nesymetrie při provozu střídavé trakce 25 kV, 50 Hz	31
2.2.3	Prostředky pro zmírnění nesymetrie.....	34
2.3	Harmonické	37
2.3.1	Teoretický rozbor harmonických, jejich vznik a účinky	37
2.3.2	Možnosti omezení harmonických	43
2.3.3	Definice výkonů a účinníků pro neharmonické průběhy.....	48
2.3.4	Účinník a harmonické při provozu střídavé trakce 25 kV, 50 Hz.....	52
2.3.5	Zlepšení účinníků a zmírnění harmonických střídavé trakce 25 kV, 50 Hz	56
2.3.6	Harmonické a účinník při provozu stejnosměrné trakce 3 kV	62
3	Měření ve vybrané transformovně	67
3.1	TNS Blansko	67
3.1.1	Popis stanoviště TNS.....	67
3.1.2	Popis zařízení TNS.....	68
3.2	Schéma TNS a místo připojení měřicí aparatury.....	70
4	Zpracování měření.....	72
4.1	Vyhodnocení velikosti napájecího napětí a napěťové nesymetrie.....	74
4.2	Vyhodnocení harmonických a účinníků.....	79
4.3	Shrnutí výsledků měření	83
5	Závěr	85
	Seznam použitých zdrojů	86
	Seznam příloh.....	88

1 Úvod

Elektřina jako zdroj hnací síly přitahovala pozornost železničních inženýrů a vynálezců od samého počátku vynálezu elektrického motoru. Začátky elektrického pohonu sahají do roku 1834, kdy americký kovář Thomas Davenport sestrojil první prakticky fungující elektromotor, který byl schopen pohánět některé stroje v jeho dílně. Motor byl napájený stejnosměrným proudem z elektrického článku a v zásadě už fungoval na stejném principu jako ty dnešní. Davenport dále experimentoval a v roce 1837 dal do provozu miniaturní elektrickou lokomotivu na kruhové dráze. V roce 1842 předvedl chemik Robert Davidson na železniční trati Edinburgh – Glasgow elektrickou lokomotivu s bateriovým zdrojem, která dosáhla rychlosti $6,5 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

Většímu rozšíření elektrických motorů v praxi však bránila nedostupnost dostatečně výkonných zdrojů elektřiny. Po několik desetiletí byly jediným zdrojem elektřiny elektrické články, které mohly napájet pouze elektromotory malých výkonů. Teprve vynález dynama (v roce 1858 teoretický popis, v roce 1860 funkční model) a koncem 19. století* i přenos a rozvod elektrické energie, který lze srovnat se současnou představou přenosu, umožnil zahájit rozvoj elektrické trakce v dnešním slova smyslu.

Elektrické dráhy začaly vznikat původně jako pouliční, následně se rozšiřovaly do velkých měst a průmyslových oblastí. Přednost elektrické trakce, zejména snadná obsluha a údržba, stálá provozní pohotovost, hospodárnost provozu, čistota ovzduší a další vhodné vlastnosti přiměly techniky zabývat se masovým využitím elektrického pohonu i na železnici, kde dosud převládaly parní lokomotivy.

Historický vývoj koncepce elektrických vozidel koresponduje s rozvojem v oblasti elektrotechniky. Tak byla i první elektrická závislá vozidla napájena stejnosměrným proudem a trakční motor byl rovněž stejnosměrný. Zvyšování výkonu trakčních vozidel vedlo k nutnosti přivést k vozidlu dostatek energie. I z tohoto důvodu se časem začala nabízet otázka využití střídavého proudu o vyšším napětí k napájení hnacích vozidel, která se stala aktuální a realizovatelná v souvislosti s nástupem silové polovodičové techniky.

Vývoj modernizace nových hnacích vozidel byl motivován snahou o hospodárný provoz a o plynulou a bezkontaktní regulaci jízdy. Těmto požadavkům vyhovovaly do značné míry aplikace výkonových diod a tyristorů. Při použití těchto prvků se však začaly objevovat nepříznivé rušivé vlivy, které začaly přinášet řadu problémů do jiných oblastí, jako například do energetické soustavy, sdělovací a zabezpečovací techniky a to do té míry, že by mohlo dojít k přímému či nepřímému ohrožení bezpečnosti nejenom vlakové dopravy. Tato okolnost si vyžádala velmi rychlé řešení a dala prostor vzniku a zavádění takových opatření, aby polovodičová regulace neztratila nic na svém technickém a ekonomickém významu a přitom neovlivňovala ostatní zařízení. Následující kapitoly částečně nabízejí pohled na danou problematiku – popisují fyzikální podstatu vzniku rušivých vlivů a některé způsoby jejich eliminace.

* V roce 1882 se na základě návrhu francouzského fyzika Marcela Depreze uskutečnil prakticky první využitelný přenos elektrické energie z německého města Miesbachu do Mnichova. Jednalo se o přenos stejnosměrného proudu, vedení bylo dlouhé 57 km a primárně bylo určeno pro telefonní přenos. Dynamo s napětím 1,5 kV napájelo čerpadlo fontány o výkonu 1,5 kW. Přenos byl provázen obrovskými ztrátami, dosažená účinnost přenosu byla pouhých 22 %.

1.1 Trakční proudové soustavy

Závislá elektrická trakce vyžaduje přívod elektrické energie až k hnacímu vozidlu. To lze v zásadě realizovat prostřednictvím trolejového vedení nebo třetí kolejnicí. První lokomotivu závislé trakce, která je přímým předchůdcem všech moderních elektrických kolejových vozidel, sestrojil a roku 1879 prezentoval na výstavě v Berlíně německý inženýr Werner von Siemens. Měla jediný trakční motor o výkonu 2,2 kW, byla napájena napětím 150 V a se třemi vozy jela rychlostí 7 km·h⁻¹. Od té doby šel vývoj rychle kupředu. V roce 1899 došlo také na střídavý proud a to na horské dráze Burgdorf – Thun ve Švýcarsku. Šlo o třífázovou napájecí soustavu, která vyžadovala dvě nebo tři troleje (třetí trolej byla nahrazena kolejnicí). Toto řešení mohlo sice působit neohrabaně, ale dvě experimentální německá vozidla od firmy Siemens a AEG dosáhla spolu v roce 1903 rychlosti přes 200 km·h⁻¹, jedno z nich dokonce 210,2 km·h⁻¹, což byl tehdy velkolepý výkon, který byl překonán až v roce 1953. Vozy měly tři pantografy, které odebíraly proud z vedení zavěšených v různých výškách. Střídavé napětí bylo možné regulovat od 10 kV do 14 kV a frekvenci od 38 Hz do 48 Hz. Napětí pak bylo transformováno přímo ve vozech na 435 V a 1150 V, čtyři synchronní trakční motory byly bezpřevodové o maximálním výkonu 560 kW. Další významný krok vpřed znamenalo zavedení jednofázového střídavého proudu, jak je vyvinula a roku 1905 poprvé použila švýcarská společnost Oerlikon. Tento systém již vyžadoval jen jediný vodič – trolejové vedení.

V počátcích elektrizace rozvíjela každá větší železniční společnost svůj vlastní napájecí systém. Později docházelo ke sjednocení systémů v rámci několika států, ale stále se používalo mnoha různých napětí a kmitočtů. Byla zde jistá nechuť evropských států opouštět své systémy a přestavět tratě na jiný pramenící z vojenskopolitických zájmů každého státu. Po první světové válce už byla v Evropě spousta „normálněrozchodných“ (1435 mm) elektrizovaných tratí a tato síť v podstatě umožňovala volný pohyb vozidel, což se potvrdilo při válečných operacích. V poválečném období byla železnice celkem přirozeně chápána jako důležitá součást obranyschopnosti každého státu a možnost zabránit vstupu nepřátelských lokomotiv na území státu se v té době cenila víc než volný pohyb vlaků po celém evropském prostoru. Tento stav dopravní infrastruktury je v současnosti, kdy evropské národy spolu neválčí, ale spolupracují, pro železnici velmi nevýhodný, neboť brání volnému pohybu elektrických trakčních vozidel. Zdá se, že v blízké budoucnosti se situace nezmění, neboť přebudování evropské železniční infrastruktury na jednotné provedení je otázkou mnoha let a v řadě případů i ekonomicky nereálné. Jako jediné řešení se tedy nabízí vyvinout takové hnací vozidlo, které respektuje nejednotné napájení v jednotlivých částech Evropy. (1)

1.1.1 Vznik trakčních proudových soustav v Evropě

Na prvních pokusných elektrických železnicích bylo používáno nepřilíš vysoké stejnosměrné napětí, zpočátku kolem 500 V, později kolem 1 000 V. Ve městech se tato napěťová hladina v podobě 600 V a 750 V dodnes zachovala, ale u železnic se velmi brzy projeví její limity: nízký výkon a malé vzdálenosti trakčních napájecích stanic – měníren.

Snaha použít na vozidlech jednoduché robustní asynchronní motory vedla již na přelomu 19. a 20. století k elektrizaci železnic třífázovým systémem. Dvoustopé trakční vedení a v té době obtížně regulované asynchronní trakční motory byly slabinami, které vedly k opuštění tohoto stylu. Pozornost byla proto upřena k jednofázovým systémům. Střídavé napájecí napětí v úrovni zhruba 10 kV

umožňovalo tratě racionálním způsobem elektrizovat (lehké trakční vedení, velká vzdálenost napájecích bodů), jeho transformace na lokomotivě na nižší úroveň též byla snadná, ale slabinou se stal trakční motor. Třífázový indukční motor vyžadoval rozměrné rotační měniče a jednofázový komutátorový motor byl na průmyslovém kmitočtu 50 Hz provozně nezpůsobilý, neboť jej provázelo silné jiskření na komutátoru a s ním související napalování lamel komutátoru a rychlé opotřebení uhlíkových kartáčů. Usměrnovat na lokomotivě střídavý proud na stejnosměrný nebylo v té době snadné, byla k tomu potřeba těžká a rozměrná rotační soustrojí (motorgenerátory). Proto byl kmitočet střídavého napájecího napětí snížen z obvyklých 50 Hz na jednu třetinu, tedy na $16 \frac{2}{3}$ Hz (nyní 16,7 Hz), a tím byla umožněna regulace otáček trakčních motorů jednoduchým a osvědčeným prostředkem regulace – změnou napětí – podobně jako u stejnosměrných motorů. Snížení kmitočtu na jednu třetinu se rovněž ukázalo jako rozumný kompromis mezi zvětšením rozměru transformátoru, ke kterému došlo, a zlepšenou komutací trakčních motorů, o kterou bylo tolik usilováno. Nižší kmitočet se též příznivě projevil ve snížení impedance trakčního vedení a spolu s použitím dostatečně vysokého napětí napomohl ke snížení počtu napájecích stanic, neboť ty jsou díky poměrně malým úbytkům napětí schopny napájet relativně dlouhé úseky. Snížením kmitočtu a zavedením fázově posunutých pomocných pólů komutátorových trakčních motorů se již v prvé dekádě dvacátého století podařilo dovést jednofázový systém do úspěšného stavu technické použitelnosti a některé železnice jím začaly své tratě elektrizovat.

Mnohé unikátní napětíové soustavy, používané v počátcích elektrizace železnic, například systémy využívající dvoustupé trakční vedení (při stejnosměrném či při střídavém třífázovém napájení) sice zanikly, ale rozvoj rtuťových usměrňovačů, nahrazujících ve dvacátých letech minulého století původně používané rotační konvertory, podpořil popularitu stejnosměrných systémů o vyšším napětí. Tak přichází na řadu druhý a třetí tentokrát stejnosměrný systém 1,5 kV a 3 kV. Stejnosměrný systém 1,5 kV, převzatý i prvorepublikovými ČSD, se již záhy po svém zavedení ukázal jako nákladný a výkonově omezený.

U zrodu v pořadí již čtvrtého elektrizačního systému stojí maďarský elektrotechnik Kálmán Kandó, který ve dvacátých letech minulého století ve válkou zchudlém Maďarsku uskutečnil myšlenku napájení lokomotiv střídavým proudem o průmyslovém kmitočtu 50 Hz. Proti jiným systémům nebylo nutné budovat měnirny ani zvláštní napájecí síť, trolejové napětí (tehdy) 16 kV bylo získáno pouhou transformací z elektrorozvodné sítě. Až do počátku šedesátých let 20. století se zdálo, že Maďarsko zůstane s tímto napájecím systémem osamoceno, avšak mohutný rozvoj polovodičové techniky způsobil návrat k této soustavě, která se z dnešního hlediska jeví jako nejpřespektivnější.

Tak se stalo, že v období parní trakce v podstatě propojitelnou evropskou železniční síť rozdělila v průběhu dvacátého století elektrizace železničních tratí na několik vzájemně obtížně slučitelných území, vyznačujících se stejnosměrnými napětími 1,5 kV a 3 kV a střídavými napětími 15 kV 16,7 Hz a 25 kV 50 Hz. Kromě potíží v mezistátní dopravě si několik evropských zemí, včetně bývalé Československé socialistické republiky a nyní i České republiky, zkomplikovalo dvojicí napětíových soustav i svůj vnitrostátní provoz.

Se stejnosměrným napětím 1,5 kV se lze setkat v Nizozemí, na jihu Velké Británie, ve střední a jižní Francii a v České republice pouze na tratích Tábor – Bechyně (do roku 2003 na trati Rybník – Lipno nad Vltavou). Stejnosměrným systémem 3 kV jsou napájeny tratě ve Španělsku, Itálii, Belgii, Polsku, z velké části v Rusku a na severu České a Slovenské republiky. Střídavý systém 15 kV 16,7 Hz

používají železnice v Německu, Rakousku, Švýcarsku a severské státy Švédsko a Norsko. Systém 25 kV 50 Hz napájí vysokorychlostní tratě ve Španělsku, dráhy v Portugalsku, Velké Británii, Dánsku, Maďarsku, Rumunsku, v severní části Francie, na celém Balkáně, Ukrajině, v Bělorusku a Litvě. V České a Slovenské republice napájí jih území.

Vedle těchto čtyř hlavních napájecích soustav lze na místních, městských nebo průmyslových drahách nalézt i jiné napájecí systémy, ze stejnosměrných jsou zde zejména napětí 600 V a 750 V (městská doprava), ze střídavých se jedná o 11 kV 16,7 Hz (úzkorozchodné tratě ve Švýcarsku) a někdy i třífázové soustavy o sníženém kmitočtu (některé ozubnicové dráhy). (1)

1.1.2 Vývoj trakčních proudových soustav v České (Československé) republice

Historie vzniku elektrické trakce u nás sahá do roku 1902, kdy průkopník elektrické trakce František Křižík zahájil elektrizaci tratě Tábor – Bechyně, která byla dokončena a zprovozněna v roce 1903. V roce 1908 byl na žádost železniční správy vypracován projekt na elektrizaci pražských nádraží a Vinohradského tunelu. Projekt, který uvažoval jednofázovou proudovou soustavu 10 kV 16 2/3 Hz, byl hotový v roce 1910, ale nikdy se nerealizoval. Na Slovensku byl elektrický provoz zahájen v roce 1908 na úzkorozchodné trati z Popradu do Starého Smokovce (později v letech 1911-1912 do Tatranské Lomnice a na Štrbské Pleso). Trať byla napájena stejnosměrnou trakční proudovou soustavou 1,5 kV.

Po 1. světové válce se zabývalo ministerstvo železnic elektrizací pražského uzlu s výhledem elektrizovat celou předměstskou dopravu v okolí Prahy. Komise tehdy podnikla studijní cestu do Francie, kde se seznámila s provozem stejnosměrné soustavy 1,5 kV, kterou tamní vláda v roce 1921 dekretem nařídila všem státním i soukromým francouzským drahám. Následně na základě generálního projektu elektrizace pražských nádraží a předměstské dopravy v okolí Prahy byla realizována elektrizace pražského uzlu stejnosměrnou soustavou 1,5 kV o celkové délce tratí 25 km (70 km kolejí).

Po 2. světové válce byl československému průmyslu v roce 1946 zadán jako první projekt elektrizace tratě Žilina – Spišská Nová Ves. Trať byla do provozu uvedena v roce 1956 a místy byla konstruována pro rychlost až $150 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Byla zvolena stejnosměrná trakční proudová soustava 3 kV. Tato volba se opírala o bohaté zkušenosti v zahraničí i o schopnost domácího průmyslu dosáhnout dobré úrovně technického řešení lokomotiv a to jak po stránce potřebného výkonu, tak po stránce požadované spolehlivosti. Jednoduchost lokomotiv byla vykoupena cenou trakčních měnících.

V roce 1951 byla zahájena výstavba trakčního vedení 3 kV celé hlavní tratě z Prahy do České Třebové a v roce 1957 vyjel na trať první zkušební vlak. Postupně byly stejnosměrným systémem 3 kV elektrizovány tratě tzv. I. hlavního tahu v severní části bývalého Československa (Děčín, Praha, Kolín, Česká Třebová, Olomouc, Ostrava, Bohumín, Mosty u Jablunkova, Čadca, Žilina, Poprad, Košice, Čierna nad Tisou, plus přilehlé tratě).

Druhá cesta elektrizace tratí vedla k využití jednofázového střídavého systému 25 kV 50 Hz. O elektrizaci prvního úseku v síti ČSD – trati z Plzně do Horažďovic – bylo rozhodnuto v roce 1959, v roce 1961 byl zprovozněn 20km úsek a v roce 1963 byl na této trati v celé její délce zahájen elektrický provoz. Později elektrizace tímto systémem pokračovala na jižních tratích bývalého Československa

(Cheb, České Budějovice, Jihlava, Brno, Bratislava, Štúrovo, plus přilehlé tratě). Jedním z důvodů volby této napájecí soustavy bylo umožnit výrobci elektrických lokomotiv – Škodě Plzeň – zkoušet prototypy střídavých lokomotiv určených pro export.

Rozhodnutí o zavedení druhé trakční soustavy 25 kV 50 Hz nastolilo otázku, jak v elektrizaci dále postupovat. Existovaly dvě základní možnosti. Buď zastavit elektrizaci tratí připravených pro stejnosměrnou soustavu 3 kV, a tratě již elektrizované postupně přeměnit na střídavou soustavu 25 kV 50 Hz, nebo přijmout dlouhodobou koexistenci dvou soustav na tratích ČSD. Byla zvolena druhá možnost s tím, že pro řešení styku obou trakčních soustav byla doporučena orientace na perspektivní dvouprroudové lokomotivy. (2)

1.1.3 Charakteristiky trakčních proudových soustav

Vzájemné výhody a nevýhody a tedy i pomyslné pořadí výhodnosti jednotlivých elektrizačních systémů se v průběhu dvacátého století s vývojem techniky postupně měnily. Některé evropské státy důsledně elektrizovaly svoji železniční síť jediným systémem, byť se již třeba na základě nových poznatků a možností jevil v průběhu dalších let jako nemoderní. Provozní výhodnost zaběhnutého jednotného elektrizačního systému shledaly důležitější, než dílčí výhody systému, který by byl zaveden jako druhý.

Pořadí hodnocení výhodnosti jednotlivých elektrizačních systémů silně ovlivnil zejména nástup a rozvoj polovodičové techniky. Její první aplikace, kterou byly diodové usměrňovače, pozitivně ovlivnila a v podstatě umožnila výrobu jednofázových lokomotiv využívající průmyslový kmitočet 50 Hz a stejnosměrné trakční motory, neboť předchozí řešení na bázi vybavení lokomotiv rtuťovými usměrňovači nebyla v provozu náležitě spolehlivá a rotační měniče typu Ward-Leonard byly příliš těžké. Zároveň však polovodičové diody výrazně zjednodušily provedení a z hospodárnily provoz měniren napájejících stejnosměrné dráhy, které v původním provedení se rtuťovými usměrňovači představovaly rozlehlý objekt na velkém pozemku s několika muži v trvalé službě. Přechod od neřízených polovodičových usměrňovačů k řízeným, v té době od diod k tyristorům, výrazně pomohl stejnosměrným lokomotivám, neboť technika pulzních měničů umožnila odstranit ztrátové řízení rozjezdu pomocí odporníků a opotřebení podléhajících stykačů.

DC 1,5 kV

Napětí této soustavy bylo dáno úrovní elektrotechniky v počátcích rozmachu elektrizace železnic, tedy přibližně v období mezi světovými válkami. Důvodem existence systému 1,5 kV na železnicích je v současnosti již jen udržování výchozího stavu, jeho další zavádění již není řadu let perspektivní a změna systému (za systém na okolních tratích zavedený) v rámci generální opravy infrastruktury má své opodstatnění. Vlastní trakční vozidla však jsou, jak je u tohoto systému tradicí, jednoduchá, levná a spolehlivá – na řadě míst bez problémů pracují po desetiletí.

Tento systém využívá nepříliš vysoké napětí, a proto pracuje s velkými síťovými proudy. Z toho vyplývá těžké trakční vedení, malé vzdálenosti měniren a nevelký výkonový limit. Toto napětí je vhodné spíše pro městské a vedlejší železnice než pro hlavní tratě, zejména při snaze zvyšovat

provozní rychlost se nedaří zajistit pro vozidla dodávku potřebného výkonu a při vyšších rychlostech nastupují i problémy s dynamickým chováním těžkého sběrače ve vztahu k trolejovému vedení.

Pokud nejsou použity invertorové měnírny (včetně dohodnutí výkupu navrácené elektrické energie jejím dodavatelem či distributorem), což by bylo spíš výjimečné, umožňuje tento systém rekuperovat brzdovou energii jen mezi nepříliš vzdálenými vozidly v napájeném úseku. U městských železnic s často zastavujícími vlaky jezdícími nepříliš rychle a za sebou v těsném sledu je podobně jako u tramvají a metra poměrně vysoká pravděpodobnost, že se v napájeném úseku najde k brzdícímu vozidlu konzument jím navrácené elektrické energie. Avšak u železnic s většími odstupem rychleji jezdících vlaků je pravděpodobnost úspěšnosti rekuperace nízká, maření většiny brzdícím vozidlem generované elektrické energie v brzdovém odporu je zpravidla nutností. (1)

DC 3 kV

Kvalitativně lze systém 3 kV hodnotit obdobně jako systém 1,5 kV, kvantitativně je pochopitelně jeho hodnocení úměrně vyššímu napětí příznivější. Soudobé polovodičové prvky a způsob jejich řízení již umožňují i u systému 3 kV stavbu vozidel se střídači přímo napájenými z trakčního vedení. Elektrická výzbroj trakčních vozidel systému 3 kV je proto relativně jednoduchá, lehká, prostorově nenáročná, a tedy i levná.

Svým výkonovým limitem a redukovanou hmotností hlavice sběrače ještě tento systém vyhovuje pro konvenční evropské železnice (kategorie do $200 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$), pro vysokorychlostní tratě pojižděné ucelenými jednotkami s instalovaným výkonem kolem 8 MW až 10 MW rychlostmi $300 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ až $350 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ jsou jednoznačně preferovány střídavé systémy s napětím 15 kV či 25 kV, u kterých je z důvodu nižší hodnoty síťového proudu napájení snazší.

Pravděpodobnost úspěšné rekuperace brzdové energie, daná možností jejího předání jiným vozidlům v napájeném úseku, je u systému 3 kV dobrá v husté příměstské dopravě a nedobrá v úsecích s řidší dopravou. Ve snaze zajistit dosažitelnost vhodného konzumenta energie i na větší vzdálenost, což je spojeno s překonáním poměrně velkých úbytků napětí v trakčním vedení, je při rekuperaci snaha napětí zvyšovat nad tradičně akceptované nejvyšší přípustné hodnoty, tedy nad $1,2 \cdot 3 \text{ kV} = 3,6 \text{ kV}$. Podle ČSN EN 50163 je hodnota 3,6 kV možná trvale a po dobu 5 minut je přípustné i napětí 3,9 kV, což představuje 30% nárůst z jmenovité hodnoty napětí. Tak radikální zvýšení tolerance napětí je možné jen u stejnosměrných systémů. V provozu ČD mají maximální povolené napětí 3,5 kV rekuperující vozidla řady 471 (City Elephant). Toto omezení je z důvodu skutečnosti, že souběžně používaná starší hnací vozidla jsou dimenzována na původně platné nejvyšší napětí 3,6 kV.

U již provozovaných tratí je systém 3 kV všeobecně ponecháván, nově však již tento systém není (s výjimkou elektrizace navazujících úseků) příliš rozšiřován. (1)

AC 15 kV 16,7 Hz

Hodnocení tohoto systému prošlo v několika posledních desetiletích určitými výkyvy. Příchod polovodičové techniky, tedy v první fázi možnost nahradit jednofázový trakční motor usměrňovačem

a stejnosměrným trakčním motorem a v druhé fázi přechod na bezkomutátorové třífázové trakční motory s elektronickými střídači, vede k tomu, že snížený kmitočet napájecího napětí již s obměnou parku vozidel postupně ztrácí hlavní důvod, kvůli kterému byl na počátku dvacátého století v německy mluvících zemích zaveden. Tím bylo zlepšení komutace jednofázových komutátorových trakčních motorů v důsledku snížení velikosti transformačního napětí, indukovaného v komutující cívce rotorového vinutí změnou magnetického toku hlavních pólů, na jednu třetinu. Příčinou, proč komutátorový motor komutuje podstatně hůř při střídavém napájení než při stejnosměrném, je transformační napětí, které se v kotvě indukuje od časově proměnného pole hlavních pólů.

Trakční soustava 15 kV 16,7 Hz je napájena z vlastních zdrojů. Těmi mohou být vlastní elektrárny s jednofázovými synchronními generátory nebo rotační měniče kmitočtu napájené ze soustavy 3×110 kV 50 Hz. Motor tohoto měniče tvoří třífázový šestipólový synchronní stroj a tento pohání jednofázový dvoupólový synchronní generátor. Díky rozvoji výkonové elektroniky jsou rotační měniče nahrazovány statickými měniči. Rozvoj polovodičové techniky rovněž mírně modifikoval jmenovitou hodnotu kmitočtu. Poměr 1:3, tedy 16 2/3 Hz:50 Hz, poplatný době používání rotačních měničů v systému napájení, byl v období elektronických měničů změněn na nesoudělný poměr 16,7 Hz:50 Hz z důvodu zamezení vzniku rezonančních jevů v rozvodné síti.

Obecně známou a obecně platnou nevýhodou systému 15 kV 16,7 Hz je větší průřez železa trakčního transformátoru potřebný k vytvoření příslušného magnetického toku. Problémy s velikostí trakčního transformátoru se však konstruktérům starších i zcela nových trakčních vozidel o výkonech přes 6 MW podařilo vcelku dobře zvládnout. Nicméně zejména kvůli optimalizaci parametrů nízkopodlažních příměstských jednotek (již i s konvenčními transformátory realizovaných) jsou hledána a ověřována i nová řešení: vynechání trakčního transformátoru (tedy přímé napájení trakčního měniče a trakčních motorů), použití vstupního vysokonapěťového střídače a vysokofrekvenčního transformátoru s keramickým jádrem nebo použití kryogenního transformátoru se supravodivým vinutím.

Z hlediska rekuperace má tento systém velkou výhodu a ze všech čtyř základních systémů zde dosahuje rekuperace nejvyšší účinnosti (ačkoli tvůrci tohoto systému tento záměr zcela jistě neměli). V principu je to dáno obousměrnou průchodností trakční transformovny a zejména vlastní jednofázovou rozvodnou sítí, propojující jednotlivé trakční napájecí stanice. To umožňuje přenášet rekuperovanou energii rozvodnou sítí z úseku, kde nebyla spotřebována, do jiné napájecí stanice. Díky (vlivem sníženého kmitočtu) nízké induktivní reaktanci trakčního i rozvodného vedení jsou rekuperující vozidla schopna najít si i značně vzdáleného konzumenta elektrické energie a to i bez potřeby příliš zvyšovat při brzdění trakční napětí. Praktickým důsledkem této skutečnosti je fakt, že vozidla tohoto napěťového systému vybavená elektrodynamickou brzdou v podstatě téměř nepotřebují brzdové odporníky, skoro vždy se pro rekuperujícím vozidlem dodávanou energii najde v síti spotřeba. Pouze ve výjimečných případech, když síť není schopna elektrickou energii odebrat, vstupuje v činnost mechanická brzda. (1)

AC 25 kV 50 Hz

Nejmladší evropský elektrizační systém má, podobně jako předchozí systém, proti stejnosměrným systémům výhodu ve větší výkonové zatížitelnosti a ve větší vzdálenosti napájecích stanic. Díky

možnosti odběru vysokého výkonu a díky nízké redukované hmotnosti hlavice sběrače se dobře hodí i pro vysokorychlostní tratě. Při zavádění této soustavy se předpokládalo, že napájecí stanice bude prostá jednofázová transformovna.

Na rozdíl od doby svého vzniku v padesátých letech minulého století se však u tohoto systému později projevilo několik komplikací. Ty v podstatě nesouvisí se systémem samotným, ale s faktem, že pro své napájení nevyužívá vlastní rozvodnou přenosovou síť (jako je tomu u systému 15 kV 16,7 Hz), ale všeobecnou distribuční síť.

První komplikací představuje skutečnost, že všeobecnou rozvodnou síť, v podstatě řešenou pro třífázové rovnoměrně působící odběry, nezatěžuje železnice ve všech třech fázích rovnoměrně a navíc ji zatěžuje časově proměnlivě. To může způsobovat dodavateli elektrické energie jisté problémy, který navíc může požadovat po provozovateli dráhy různé tarifní přírážky, jimiž bude kompenzovat vyšší náklady, které mu tento druh odběru přináší. Přitom vývojové trendy na straně železnice a elektrárenství jsou v určité disproporci. Snaha železnice o jízdy vyššími rychlostmi zvyšuje časovou nerovnoměrnost odběru – odběrové špičky jsou vyšší a působí kratší dobu. Naopak přechod z uhelné na jadernou energetiku vyžaduje trvalé zatížení elektráren stálým výkonem, větší výkonové disproporce je nezbytné vyrovnávat například přečerpávacími hydroelektrárnami.

Druhou komplikací jsou nesinusové odběry trakčního proudu hnacích vozidel staršího data výroby a s tím spojené emise vyšších harmonických proudů do distribuční sítě. O těchto dvou problémech podrobněji pojednává 2. kapitola.

Další problém představuje otázka rekuperace elektrické energie. Těžiště problému, proč, na rozdíl od tratí využívajících jednofázový systém 15 kV 16,7 Hz se samostatnou rozvodnou sítí, nemohou v některých případech na jednofázovém systému 25 kV 50 Hz rekuperovat ani nejmodernější vozidla se čtyřkvadrantovými vstupními měniči, má v podmínkách ČD podstatně hlubší a techničtější příčinu. Znemožňuje to před mnoha lety zavedený způsob vzájemného propojení distribuční sítě a trakčních transformoven. Trakční transformovna je průchozí pro oba směry toku elektrické energie, ta může transformátorem procházet z rozvodné sítě do trakčního vedení i opačně. Tato vlastnost je pro rekuperaci příznivá, ale bez ohledu na ni způsobuje nepříjemnosti při dvoustranném napájení trakčního vedení, o kterém se v době projektování uvažovalo, ale které nebylo nikdy provozováno. Dvě sousední trakční transformovny by byly propojeny dvakrát: na primární straně distribuční sítě a na sekundární straně trakčním vedením. Právě přes trakční vedení by došlo k průchodu vyrovnávacího výkonu nezanedbatelných hodnot v důsledku měnicích se hodnot napětí v přípojovacích bodech obou sousedních trakčních transformoven, což by způsobilo nežádoucí proudové zatížení trakčního vedení a dále by zde bylo nebezpečí, že v případě výpadku v distribuční síti, zkratech a podobně, by sloužilo trakční vedení jako nežádoucí paralelní přívod a snažilo by se postižené místo napájet. Proto byly již od dob elektrizace tratí jednofázovým systémem 25 kV 50 Hz trakční transformovny takto napájených tratí opatřeny na vstupní straně citlivým zpětným (wattovým) relé, reagujícím na změnu smyslu činné složky proudu v přívodu do napájecí stanice. V případě, že se objeví proud tekoucí z transformovny do distribuční sítě, dávají tyto ochrany neprodleně povel k přerušení přívodu, neboť by mohlo jít o nežádoucí přítok energie do místa zkratu. Zhruba čtyřicet let tato skutečnost provozu železnic nevadila, neboť jednotlivé úseky trakčního vedení jsou u ČD napájeny zásadně jednostranně, potíže se projeví až u vozidel se schopností rekuperovat. Nemá-li rekuperující vozidlo zajištěn odběr jím dodávané elektrické energie v napájeném úseku, začne

předávat energii do distribuční sítě, výše popsaná ochrana to vyhodnotí jako možné nežádoucí napájení zkratu v distribuční síti a ihned vypne celou napájecí stanici. Protože rekuperující vozidlo nemá informaci, zda má či nemá jím dodávaná elektrická energie v napájeném úseku spotřebitele, nelze na takto napájených tratích v současnosti rekuperovat a vozidla s elektrodynamickou rekuperační brzdou musí trvale mařit brzdovou energii v brzdovém odporníku.

Z určitého pohledu je sporná také otázka vykupování rekuperované elektrické energie, zvlášť když její velikost, okamžik zahájení dodávky a dobu trvání nedokáže železnice předem přesně a závazně stanovit. Ve věci rekuperace elektrické energie zpět do distribuční sítě působí nejen výše popsané záležitosti snahy energetiky o ustálené a vyrovnané poměry ve výrobě a spotřebě, ale i přirozená snaha dodavatele elektrické energie vyrábět a prodávat elektrickou energii, a nikoliv jí vykupovat zpět. (1)

Přehled napětí hlavních napájecích proudových soustav dle ČSN EN 50163 (3) je uveden v tab. 1.

Tab. 1 - Jmenovitá napětí, jejich přípustné mezní hodnoty a doby trvání

Elektrizační soustava	Nejnižší krátkodobé (max. 2 min.) napětí (kV)	Nejnižší trvalé napětí (kV)	Jmenovité napětí (kV)	Nejvyšší trvalé napětí (kV)	Nejvyšší krátkodobé (max. 5 min.) napětí (kV)
1,5 kV DC	1	1	1,5	1,8	1,95
3 kV DC	2	2	3	3,6	3,9
15 kV 16,7 Hz AC	11	12	15	17,25	18
25 kV 50 Hz AC	17,5	19	25	27,5	29

1.1.4 Styk odlišných trakčních proudových soustav

Z kapitoly 1.1.2 je zřejmé, že problematika styku dvou různých trakčních proudových soustav není doménou pouze při mezinárodním styku, ale vzniká i v rámci jednoho státu. V praxi se řeší styk odlišných trakčních proudových soustav několika způsoby.

1. Ve stykových stanicích dochází k přetahům elektrických lokomotiv pomocí lokomotiv nezávislé trakce (dieselové lokomotivy). Stanice mívá zpravidla dvě kolejiště a trolejové vedení je podélně rozdělené neutrálními (s kolejí uzemněnými) úseky trakčního vedení. Vlak přijíždějící například ze strany trakční proudové soustavy 3 kV přejíždí setrvačností se staženými sběrači neutrální úsek a vjíždí pod trolejové vedení úseku napájeného 25 kV 50 Hz. Dieselová lokomotiva následně

přetáhne odpojenou stejnosměrnou lokomotivu zpět na stejnosměrnou stranu a připravená střídavá lokomotiva přijede k vlaku vlastní silou. Přetahy vozidly nezávislé trakce jsou časově náročné, vyžadují stálou pohotovost dieselových lokomotiv a zvýšený počet zaměstnanců. Tímto způsobem byl například řešen styk v železniční stanici Kutná Hora.

2. Ve stykových stanicích dochází k přepínání trolejového vedení. Postup při výměně lokomotiv je jednodušší, neboť všechny výměny probíhají vlastní silou elektrických lokomotiv bez použití dieselové lokomotivy. Doby prostojů ve stanicích jsou kratší, ale kolejiště, trolejové vedení i zabezpečovací zařízení musí být pro tento účel uzpůsobené (univerzální), což zvyšuje investiční náklady.

3. Použitím dvousystémových (vícesystémových) hnacích vozidel klesají investiční náklady na pevné trakční zařízení ve stanici na minimum a prostoje vlaků ve stanicích jsou nulové. Na mnoha tratích se změny proudových soustav realizují pomocí stykových úseků mimo železniční stanici – na širé trati. Mezi odlišné trakční proudové soustavy se vloží neutrální úsek, hnací vozidla jej projíždějí setrvačností se staženými sběrači. Mezitím se lokomotiva přepojuje na druhou proudovou soustavu. Délka tohoto úseku nesmí být menší než je dvojnásobná délka elektrické motorové jednotky (řádově se jedná o stovky metrů).

Způsob řešení styku dvou různých trakčních proudových soustav se volí s ohledem na konkrétní specifické podmínky daného místa, ale obecně lze konstatovat, že je preferován způsob opírající se o použití vícesystémových lokomotiv. (2)

1.2 Trakční měnírny

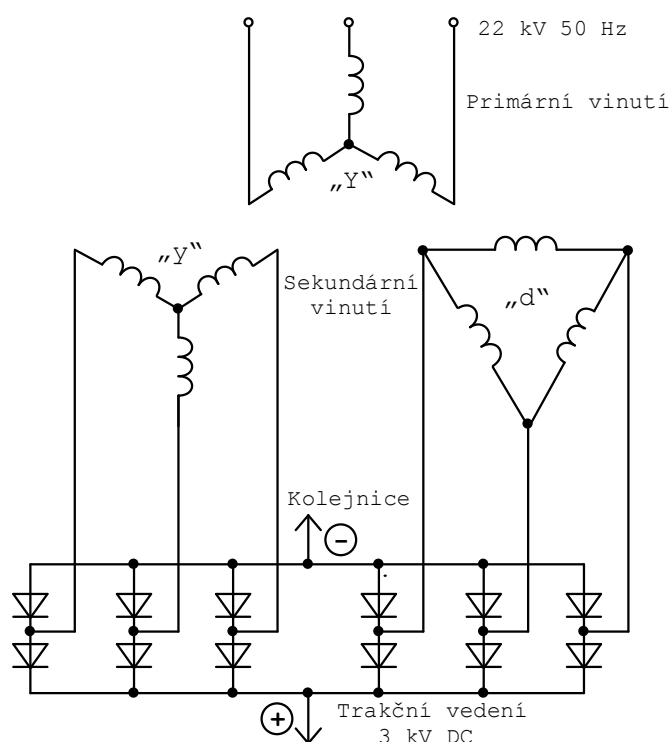
Stejnoseměrná trakční proudová soustava je napájena z trakčních měniren. Napětí do trakční měnírny je přivedeno buď z distribuční sítě 110 kV 50 Hz, pak následuje transformace 110/22 kV, nebo ze sítě 22 kV 50 Hz. V obou případech následuje transformace 22/3 kV a poté usměrnění. Praxe ukázala, že dvojí transformace s mezistupněm na napěťové hladině 22 kV je výhodnější a provozně spolehlivější. V minulosti byl učiněn pokus vyloučit mezinapětí 22 kV a napájet usměrňovací jednotky přímo ze soustavy 110 kV, ale při ověřování této koncepce, která slibovala původně omezení investičních nákladů, docházelo k potížím zejména z hlediska likvidace vnějších i vnitřních zkratů. Právě vypínání těchto poruchových stavů a jiné provozní potíže byly nakonec důvodem pro její opuštění.

Provedení transformátorů 110/22 kV bývá jako dvouvinutové Yy nebo jako trojvinutové 110/22/6 kV, Yyd, přičemž terciární vinutí slouží k napájení traťového zabezpečovacího zařízení. Transformátory jsou regulovatelné pod zatížením s přepínačem odboček na primární straně, regulace se může provádět i dálkově z dispečinku. Jejich výkony se zpravidla pohybují v rozmezí 10 MV·A až 20 MV·A, procentní napětí nakrátko u_k bývá kolem 11 %.

Realizace transformace 22/3 kV je uskutečněna pomocí speciálních trojvinutových transformátorů 22/3/3 kV v provedení Yy0d1 nebo Yy0d11. Fázový posun 30° elektrických je zásadní podmínkou pro následné dvanáctipulzní usměrnění. Tyto transformátory se v současné době vyrábějí v suchém provedení s možností ofukování ventilátory, výkonově se pohybují od 5,3 MV·A do 10 MV·A.

Vlastní napájení měnirny zabezpečuje transformátor vlastní spotřeby 22/0,4 kV rovněž v suchém provedení o výkonu zpravidla 160 kV·A. Součástí zařízení měnirny je i rozvod 6 kV, který napájí traťové zabezpečovací zařízení. Napětí 6 kV lze získat výše zmíněnou transformací ze 110 kV nebo ze samostatného transformátoru 22/6 kV. V některých měnirách se lze setkat i se zvyšovacím transformátorem 0,4/6 kV napájeným z rozvodu vlastní spotřeby.

Trakční usměrňovač používaný u ČD má jednotné schéma tvořené dvěma paralelně pracujícími trojfázovými můstky (obr. 1.1), což umožňuje dvanáctipulzní usměrnění trakčního proudu. V počátcích elektrizace tratí byly měnirny osazeny rtuťovými usměrňovači, později došlo k jejich výměně za germaniové a následně křemíkové diody. Původní schéma trakčního usměrňovače obsahovalo i tzv. nulovou tlumivku zapojenou mezi kladné vývody obou můstků, jejíž funkce spočívala v oddělení obou sekcí v oblasti komutace proudů, která pak probíhala v rámci každého můstku samostatně, jako by se jednalo o dva šestipulzní usměrňovače.



Obr. 1.1 - Schéma trakčního usměrňovače

Součástí stejnosměrných 3kV rozvaděčů jsou vzduchové tlumivky 4 mH (bez magnetického obvodu z důvodu zamezení jeho přesycení při zkratu), které se obvykle zapojují do série ke každé usměrňovací jednotce (kladný pól) nebo do společného zemního pólu celé trakční měnirny. Jejich účelem je omezit strmost nárůstu zkratového proudu.

Úseky trakčního vedení napájené z jednotlivých trakčních měniren nemusí být u stejnosměrného systému vzájemně galvanicky odděleny, jak je tomu u střídavé trakce, a vedení lze napájet oboustranně. Možnost podélně propojených traťových úseků umožňuje mírně snížit výstupní napětí z měniren, což má mimo jiné pozitivní dopad na úspěšnost rekuperace. Vzdálenosti mezi sousedními trakčními měnirami se u ČD pohybují na hlavních tratích v průměru kolem 20 km. (4), (5)

1.3 Trakční transformovny

Trakční transformovny jsou napájeny z distribuční sítě 110 kV a po transformaci 110/27 kV (27 kV je jmenovitá hodnota vnitřního napětí trakční transformovny) napájejí jednofázovou střídavou trakční proudovou soustavu 25 kV 50 Hz. Připojení trakční transformovny k distribuční síti je zpravidla realizováno pomocí rozvodny typu „H“, která umožňuje připojení k 110kV síti u jednoduchého vedení zasmyčkováním nebo u dvojitého vedení odbočením. Rozvodny 110 kV jsou buď venkovní, nebo vnitřní (zapouzďené).

Konstrukční řešení trakčních transformátorů je zcela odlišné od běžně používaných energetických transformátorů. Jsou to jednofázové transformátory, které mají konce primárního vinutí připojené na dvě fáze – sdružené napětí – vedení 110 kV. Transformátory mají zvýšenou zkratovou odolnost a musí zvládnout i velkou krátkodobou přetížitelnost (maximálně 200 % po dobu 2 minut), která je dána charakterem proměnlivého trakčního odběru. Jsou regulovatelné přepínáním odboček na primární straně v rozsahu $\pm 8 \times 2 \%$. ČD v zásadě používají tři typové trakční transformátory s výkony 6,5/8 MV·A, 10/12,5 MV·A a 10/13,3 MV·A. Hodnoty udávají jmenovitý výkon bez ofukování/s ofukováním. Napětí nakrátko u_k bývá kolem 12,5 %.

Nezbytnou součástí trakční transformovny je filtračně-kompenzační zařízení, které zamezuje vstupu 3. a 5. proudové harmonické do distribuční sítě a současně kompenzuje jalovou složku proudu první harmonické a udržuje účinník první harmonické ve stanovených mezích. Připojuje se na sekundární stranu trakčního transformátoru. Jeho schéma a popis je na obr. 2.25 na straně 58.

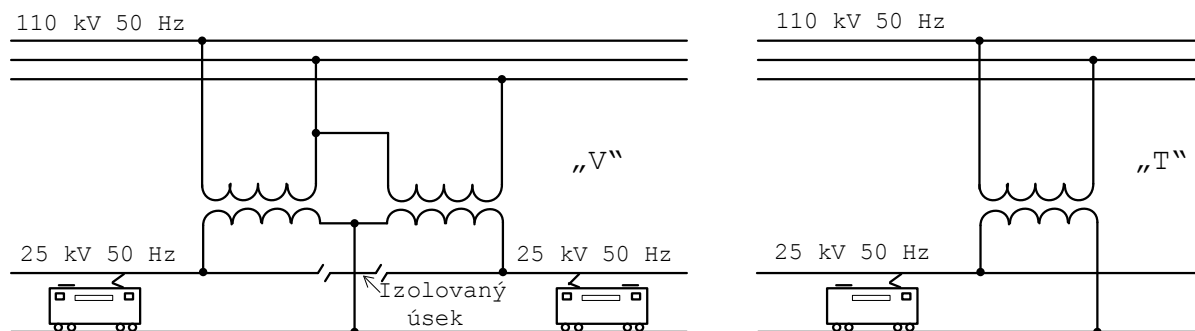
Podrobnější popis trakční transformátorové stanice je v kapitole 3.1.

V trakčních transformovných jsou v převážné většině případů instalovány dva transformátory, přičemž v provozu mohou být oba současně, nebo jeden a druhý slouží jako záloha. To záleží na koncepcích napájení, které jsou uvedené dále. Jednotlivé úseky trakčního vedení 25 kV 50 Hz jsou u ČD napájeny zásadně jednostranně. Proti sousední trakční napájecí stanici je zajištěno elektrické podélné dělení například formou spínací stanice s izolovaným úsekem, aby se zamezilo překlenutí obou sousedních traťových úseků. ČD provozují dvě schémata jednostranného napájení (obr. 1.2):

1. Schéma označované „V“ obsahuje dva trakční transformátory a je charakterizováno tím, že jeden transformátor napájí traťový úsek ve směru „doleva“ a druhý transformátor napájí traťový úsek ve směru „doprava“. Nezávisí na tom, zda se jedná o jednokolejný či dvoukolejný traťový úsek. Traťový úsek je vymezen trakční transformátorovou stanicí a trakční spínací stanicí. Toto schéma se používá na traťových úsecích značně zatížených nebo v místech, kde je trakční transformátorová stanice připojena do sítě 110 kV s menším zkratovým výkonem, aby se poněkud snížila nesymetrie zatížení této sítě. Oba trakční transformátory jsou připojeny na rozdílné fáze.

2. Schéma označované jako „T“ používá pro napájení obou směrů traťových úseků pouze jeden trakční transformátor. Opět nezáleží na tom, zda se jedná o jednokolejný či dvoukolejný traťový úsek. Trakční transformátorová stanice obvykle leží přibližně uprostřed celkové délky napájeného úseku.

(4)



Obr. 1.2 - Koncepce napájení trakčního vedení u ČD: „V“ a „T“ schéma

Vzdálenosti mezi sousedními trakčními transformátorovými stanicemi se u ČD pohybují v průměru kolem 42 km.

1.4 Hnací vozidla elektrické trakce

Prudký rozvoj elektrizace železnic na celém světě po druhé světové válce způsobil, že bylo vyvinuto mnoho typů elektrických hnacích vozidel, jimiž se ověřovaly nové směry v koncepci, konstrukci, výrobní technologii i v údržbě. Vývoj elektrických hnacích vozidel je u nás charakterizován několika stadii.

První stadium vývoje zahrnuje hnací vozidla, jimiž se započal rozvoj elektrické trakce. Vozidla stejnosměrné trakční proudové soustavy mají stejnosměrné sériové trakční motory, které se spouštějí ztrátově předřadnými odporníky ve spojení se skupinovým spínáním a změnou buzení. Vozidla střídavé trakce se vyznačují bezztrátovou regulací rychlosti pomocí přepínání odboček na primární straně trakčního transformátoru s následným usměrněním proudu neřízeným usměrňovačem. Trakční motory jsou buď normální stejnosměrné sériové motory, u nichž bočním odporníkem k vinutí hlavních pólů je vyhlazován budicí proud, nebo se používá speciálně stavěných motorů na vlnivé napětí. K vyhlazení dvojpulzně tepajícího proudu slouží tlumivky se železem a s otevřeným magnetickým obvodem. Trakční motory stavěné pro vlnivé napětí mohou pracovat bez těchto tlumivek.

V dalším stadiu vývoje hnacích vozidel byla řešena otázka snižování ztrát při regulaci. Toto stadium je charakterizováno uplatněním polovodičové techniky v silových i řídicích obvodech hnacích vozidel. Nové systémy regulace se vyznačují možností plynulé regulace proudu a napětí a možností použít a plynule řídit vysoce výkonnou elektrodynamickou brzdu. U hnacích vozidel na stejnosměrný proud jsou k tomuto účelu používány pulzní měniče, které nahradily ztrátové rozjezdové odporníky a příslušnou spínací aparaturu. U hnacích vozidel na střídavý proud je to použití tyristorových řízených usměrňovačů na sekundární straně transformátoru. Transformátor pak má pevný převod. Rovněž pomocné pohony hnacích vozidel byly vybaveny bezkontaktním spínáním a plynulou regulací rozběhu a otáček. V neposlední řadě polovodičová technika umožnila konstrukci dvousystémových i třísystémových hnacích vozidel, což předtím bylo obtížné s ohledem na velkou (limitující) hmotnost souborů všech komponentů. V oblasti trakčních motorů došlo k nahrazení sériových motorů trakčními motory s cizím buzením.

Další pokrok v oblasti výkonové a řídicí elektroniky vedl k odklonu od používání komutátorových trakčních motorů a aplikaci třífázových asynchronních trakčních motorů. Tyto motory byly zpočátku řízeny pomocí proudových střídačů. Škoda Plzeň zkoušela prototypovou (a jedinou) lokomotivu tohoto typu s továrním označením 85 EO (řada 169 přezdívaná Asynchron) od roku 1987, ale její sériová výroba se nikdy neuskutečnila.

V současnosti jsou asynchronní trakční motory napájeny a regulovány měniči s plynule proměnným napětím a frekvencí. S nástupem nových spínacích prvků (tyristory GTO, IGCT, tranzistory IGBT)* byly vytvořeny příznivé podmínky pro široké uplatnění frekvenčně řízených střídačů v oblasti regulace indukčních strojů. U hnacích vozidel s GTO tyristory je v režimu stejnosměrné trakce vlastnímu trakčnímu měniči zpravidla předřazen pomocný (snižující) měnič na stejnosměrné mezinapětí a pro střídavou trakci zajišťuje stejnosměrné mezinapětí pulzní usměrňovač, který může plnit při rekuperačním brzdění i funkci střídače (čtyřkvadrantový měnič). U ČD byla prvním hnacím vozidlem s GTO tyristory stejnosměrná posunovací lokomotiva řady 114 (90E). Měniči s GTO tyristory jsou rovněž vybaveny elektrické třísystémové jednotky řady 680 (Pendolino).

Nejnověji jsou používány v trakčních měničích hnacích vozidel s třífázovými asynchronními trakčními motory výkonové spínací tranzistory IGBT zpravidla v kaskádním řazení (snížení jejich svorkových napětí). Díky tomuto řazení je možné v režimu stejnosměrné trakce 3 kV zcela vypustit vstupní snižující pomocný měnič a výkonové trakční měniče připojit přes LC filtr přímo na plné napětí trakčního vedení. Na střídavé trakci se využívá pro získání stejnosměrného mezinapětí pulzních usměrňovačů. Pulzní usměrňovač umožňuje aktivní filtraci odebíraného trakčního proudu, takže průběh proudu se blíží sinusovému a účinník první harmonické se blíží jedné. Trakční měniče s IGBT jsou aplikovány na nových hnacích vozidlech Škoda řady 380 (109E), dále v elektrických motorových jednotkách řady 471 (City Elephant) a v hnacím vozidle Siemens řady ES 64 U4 (Taurus) zajíždějícím na tratě ČD.

Další vývoj směřuje k řešení trakčního pohonu synchronním motorem s permanentními magnety. Nové technologie výroby permanentních magnetů ze zvláštních zemin umožnily konstrukci těchto motorů a jejich použití pro oblast elektrické trakce. Pro železniční hnací vozidla jsou synchronní motory k dispozici pro výkony zhruba do 300 kW. Synchronní motor s permanentními magnety má ve srovnání s asynchronním motorem několik pro elektrickou trakci důležitých předností. Je to především vyšší krouticí moment vztažený na hmotnost stroje (maximální moment může vyvíjet v klidovém stavu, což je pro trakční pohon důležitá vlastnost), menší moment setrvačnosti, menší oteplení a vyšší momentovou přetížitelnost. (6)

* GTO (Gate Turn-Off, hradlem vypínatelný tyristor): tyristor je možné zapnout i vypnout proudem řídicí elektrody. Mezi výhody patří nízký úbytek napětí v propustném směru, velká zkratová odolnost a vysoká životnost. Hlavní nevýhoda GTO tyristorů spočívá v procesu jejich vypínání – potřebují paralelní odlehčovací obvod. Používají se v trakčních měničích pro větší výkony a vyšší napětíové hladiny.

IGCT (Integrated Gate-Commutated Thyristor, tyristor řízený integrovaným hradlem): velmi „tvrdě“ komutovaný (extrémně rychle vypínaný) GTO tyristor. Oproti GTO má vyšší frekvenci spínání, významně sníženy vypínací ztráty a nepotřebuje odlehčovací obvod.

IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor, bipolární tranzistor s izolovaným hradlem): má výborné dynamické vlastnosti (vysoká spínací frekvence). Původně bylo limitujícím faktorem provozní napětí měniče, proto se IGBT používaly v aplikacích pro lehkou trakci, v současné době dosahuje blokovací napětí až 6,5 kV a díky tomu si našly cestu i do výkonných hnacích vozidel.

2 Nepříznivé vlivy elektrické vozby na napájecí soustavu

Trakční odběry jsou významným odběratelem elektrické energie z distribuční sítě. Představují dynamické odběry, časově i kvantitativně značně nestálé, nepředvídatelné. Při provozování elektrické trakce dochází ke vzájemnému ovlivňování mezi elektrickým spotřebičem a ostatními elektrickými zařízeními. Celou rozsáhlou problematiku lze shrnout do oblasti EMC, přičemž je nutné rozlišovat, zda spotřebič svou funkcí ovlivňuje okolí, nebo spotřebič je ovlivňován okolím. V obou případech se jedná o vztah *jednosměrný*, ovšem může nastat i situace, kdy spotřebič ovlivňuje a zároveň je ovlivňován okolím – v tomto případě se jedná o vztah *obousměrný*.

V podmínkách provozu elektrické trakce se problematika EMC řeší především v oblasti napájení elektrizovaných drah obou trakčních proudových soustav. Každá má však svá specifika a to, co u jedné způsobuje značné problémy, u druhé se nemusí vyskytovat vůbec. V následující kapitole je uveden stručný přehled vlivů v návaznosti na jejich výskyt v dané trakční proudové soustavě.

2.1 Přehled vlivů

Jednofázová střídavá trakční proudová soustava 25 kV, 50 Hz

Tato trakční proudová soustava je připojena k distribuční soustavě 110 kV a směrem k ní lze vysledovat tato působení:

- Nesymetrické dělení jednofázového výkonu do tří fází 110 kV – podrobnější rozbor je proveden v následující kapitole.
- Deformace sinusovky odebíraného proudu - podrobnější rozbor je proveden v kapitole 2.3.4.
- Nevyhovující účinník odebíraného výkonu - podrobnější rozbor je proveden v kapitole 2.3.4.
- Kolísání trakčního odběru v čase vede ke kolísání napětí, což způsobuje tzv. „flickr-efekt“. Tímto pojmem se nazývá jev kolísání světelného toku způsobeného kolísáním napětí v síti. Je definován jako subjektivní vjem kolísání světelného toku žárovky 60 W s dvojitě vinutou spirálou, kde na základě odpovědi mnoha skupin pozorovatelů byly vytvořena mezinárodně platná křivka jisté snesitelnosti tohoto subjektivního vjemu v závislosti na procentní hodnotě kolísání napájecího napětí žárovky a počtu těchto změn napětí za minutu. Z grafu vyplývá, že lidské oko je nejcitlivější na počet změn zhruba 1000 za minutu, tedy 17 Hz. Při této frekvenci je tento nepříjemný vjem způsoben již poklesem napětí o 0,28 % z jeho jmenovité hodnoty. Při větší frekvenci pak citlivost oka klesá (setrvačnost vjemu), takže se připouští i větší hodnoty změn napětí. Z hlediska TNS lze konstatovat, že doposud „flickr-efekt“ nebyl pozorován, a to ani při osvětlení žárovkami, ani výbojkami či zářivkami, ačkoliv místní napětí pro tato svítidla je odvozováno ze stejného zdroje, ze kterého je napájeno trakční zařízení. (4)
- Ovlivňování úrovně ovládacího kmitočtu soustavy HDO – problematika „odsávání“ signálu HDO je analyzována v kapitole 2.3.5.

Jelikož z hlediska vzájemného ovlivňování zátěže a okolí se jedná o obousměrný vztah, je třeba analyzovat i působení napájecí sítě 110 kV na trakční zařízení. Jde především o tyto faktory:

- Deformace sinusovky napájecího napětí sítě – tuto deformaci způsobují jiné nelineární spotřebiče připojené k síti; tento stav se označuje jako „elektrické pozadí“.
- Nebezpečí přetěžování filtračně-kompenzačních zařízení ČD harmonickými napětími z napájecí sítě bez vlivu ČD.
- Nesouměrnost napětí tří fází v síti způsobovaná např. ostatními odběrateli nebo nevhodnou geometrickou konfigurací venkovního vedení.
- Kolísání napětí v síti způsobené odběrem výkonu jinými spotřebiči.

Pro úplnost nelze zanedbat ani působení elektrického hnacího vozidla na traťové sdělovací a zabezpečovací zařízení. V tomto případě se jedná o jednosměrné ovlivňování. (4), (7)

Stejnoseměrná trakční proudová soustava 3 kV

Tato trakční proudová soustava je připojena k distribuční soustavě 22 kV přes trakční měnič. Z hlediska zpětného působení na napájecí soustavu je na tom stejnosměrná vozba nesrovnatelně lépe než střídavá. Při rozboru působení stejných vlivů jako v případě střídavého napájení elektrické trakce lze dospět k následujícím závěrům:

- Nesymetrické zatížení napájecí sítě je v zásadě vyloučeno použitým schématem zapojení transformátoru a usměrňovací jednotkou (kapitola 1.3). Z tohoto hlediska lze pohlížet na stejnosměrnou trakční proudovou soustavu jako na ideální spotřebič velkého výkonu.
- Hledisko odběru nesinusového proudu je značně redukováno použitím dvanáctipulzního trakčního usměrňovače – prakticky první harmonická je až 11. – detailnější pohled na problematiku je v kapitole 2.3.6.
- Hodnota účinnosti trakčních měničů je vyhovující.
- Ovlivňování úrovně ovládacího kmitočtu soustavy HDO je vyloučeno induktivním charakterem vstupní impedance trakčního usměrňovací jednotky.
- Kolísání napětí způsobující „flickr-efekt“ nebylo pozorováno. (7)

Rovněž u stejnosměrné trakční proudové soustavy se ve spektru zpětného trakčního proudu objevují kmitočty odvozené z činnosti pulzního měniče hnacího vozidla, které mohou mít vliv na činnost traťového zabezpečovacího zařízení. Mimoto zde vznikají tzv. „bludné proudy“, to jsou situace, kdy zpětný proud se neuzavírá kolejnicí, ale „najde“ si cestu menšího odporu například potrubím nebo jinou kovovou konstrukcí a v místě, kde jej opouští, pak dochází k elektrokorozi.

Na druhou stranu výstupní napětí z trakčního měniče obsahuje dvě složky: stejnosměrnou (3 kV DC) a složku střídavé superpozice, jejíž spektrum závisí na schématu usměrňovače. Pro dvanáctipulzní schéma usměrňovače jsou to frekvence 600 Hz, 1200 Hz, 1800 Hz atd. Efektivní hodnoty složek střídavé superpozice výstupního napětí dosahují pro jmenovité zatížení v procentech napětí naprázdno těchto hodnot: cca 2 % pro 600 Hz a cca 1,1 % pro 1200 Hz. Pro tyto složky se TNS jeví jako zdroj napětí, takže hodnoty složek proudů těchto frekvencí jsou závislé na impedanci vnějšího trakčního obvodu na těchto frekvencích, ale z hlediska nepříznivých vlivů na napájecí síť nepředstavují výraznější problém. (4)

Aby byl výčet vzájemných vlivů úplný, nelze pominout i působení napájecí sítě 22 kV na trakční zařízení. Jak již bylo zmíněno výše, sekundární vinutí transformátoru dvanáctipulzního trakčního usměrňovače obsahuje dvě sekce s odlišným schématem (hvězda a trojúhelník). Bylo zjištěno, že za jistých okolností diodové můstky obou sekundárních vinutí jsou zatěžovány různými proudy, tento jev byl seznán jako nezávislý na celkovém zatěžovacím proudu a poměr těchto dvou proudů se během doby měření měnil. Analýza prokázala, že na vině je deformace časového průběhu napájecího napětí z relativně slabé sítě 22 kV, 50 Hz harmonickými, které pocházely z velkého průmyslového komplexu. Rozdílné časové průběhy napájecího napětí na obou sekcích se projeví tím, že hvězďová sekce dodávala větší hodnotu usměrněného napětí, a byla tedy více zatížena než trojúhelníková. Zásadní vliv zde měla 5. harmonická, která navíc měnila i fázi vlivem změny zatížení uvedeného průmyslového komplexu. Nutno však podotknout, že se jednalo o zcela ojedinělý případ rušení lokálního charakteru. (4)

2.2 Proudová a napěťová nesymetrie

2.2.1 Teoretický rozbor nesymetrie, její příčiny a důsledky

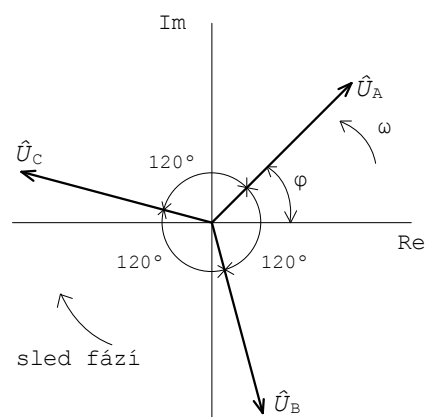
Teorie silnoproudých elektrických obvodů vychází z obecné teorie elektrických obvodů a zkoumá problémy, které jsou spojeny s výrobou a přenosem elektrické energie. Vyšetřuje především trojfázové obvody a to v normálním i havarijním stavu.

Trojfázové soustavy mají v elektrotechnice základní význam: pomocí nich se elektrická energie vyrábí, přenáší, distribuuje a spotřebovává. Oproti jednofázové soustavě mají několik výhod: trojfázové stroje (motory, generátory, transformátory) mají výhodnější provozní vlastnosti (zejména účinnost) a nižší výrobní náklady; přenos elektrické energie je hospodárnější; z trojfázové sítě lze odebrat dvojí napětí. Trojfázové zdroje mají v jediném konstrukčním celku uspořádány tři jednofázové zdroje harmonického napětí, navzájem jsou elektricky nezávislé a mají stejný kmitočet. Zpravidla jsou navrženy tak, že každá dvojice po sobě následujících napětí má fázový posun $\alpha = 2\pi/3$ a efektivní hodnota napětí (nebo proudů) jednotlivých fází je stejná $U_A = U_B = U_C$. Tyto zdroje se nazývají *symetrické (souměrné) trojfázové zdroje* a v případě, že symetrie je zachována i v elektrizační soustavě, jedná se o *symetrickou (souměrnou) trojfázovou soustavu* (obr. 2.1). Pro okamžité hodnoty napětí (stejně vztahy platí i pro proudy) platí:

$$u_A(t) = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (2.1)$$

$$u_B(t) = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi + \varphi\right) \quad (2.2)$$

$$u_C(t) = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi + \varphi\right) \quad (2.3)$$



Obr. 2.1 - Fázorový diagram souměrné trojfázové soustavy

Nejsou-li splněny obě uvedené podmínky, jde o *nesymetrickou (nesouměrnou) trojfázovou soustavu*.

Poznámka: je nutné rozlišovat fázory v měřítku efektivních hodnot (veličiny U, I bez indexů) a fázory v měřítku amplitud (veličiny U, I s indexem „m“). Fázorů v měřítku amplitud se použije pro znázornění časového průběhu veličin. V ostatních případech je účelné použít fázorů v měřítku efektivních hodnot, neboť charakteristickou hodnotou periodické funkce je právě její efektivní hodnota.

Trojfázová soustava je *vyvážená**, jestliže pro ni platí:

$$u_A(t) + u_B(t) + u_C(t) = 0 \quad \text{nebo fázorově} \quad \hat{U}_A + \hat{U}_B + \hat{U}_C = 0 \quad (2.4)$$

Jestliže tyto vztahy neplatí, pak soustava je *nevyvážená*.

U symetrické soustavy stačí pracovat s jedním fázorem, neboť zbývající dva jsou určeny podmínkou symetrie. Zavádí se *operátor natočení a*:

$$\mathbf{a} = e^{j\frac{2}{3}\pi} = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}; \quad \mathbf{a}^2 = e^{j\frac{4}{3}\pi} = e^{-j120^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}; \quad \mathbf{a} + \mathbf{a}^2 + 1 = 0 \quad (2.5)$$

pak pro fázory platí:

$$\hat{U}_A; \quad \hat{U}_B = \mathbf{a}^2 \cdot \hat{U}_A; \quad \hat{U}_C = \mathbf{a} \cdot \hat{U}_A \quad (2.6)$$

Jak již bylo uvedeno, v případě, že nejsou splněny podmínky stejného fázového posunu a efektivní hodnoty veličin, mluvíme o proudové nebo napěťové nesymetrii. Ta může být:

- a) amplitudová (modulová) – velikost amplitud není stejná, ale je zachován úhel $\alpha = 2\pi/3$;
- b) fázová (úhlová) – úhel α mezi fázemi není roven $2\pi/3$, ale amplitudy jsou stejné;
- c) obecná – představuje kombinaci obou výše zmíněných; tato vzniká nejčastěji (obr. 2.2).

Pro řešení nesymetrických soustav je možné jako jednu z metod řešení použít *metodu souměrných složek* (C. L. Fortescue), kdy nesymetrická soustava se rozloží na tři trojfázové soustavy symetrické, s těmito soustavami se provede analýza obvodu a nalezené výsledky se případně opět složí. Podle Fortescueovy teorie je možné n -fázovou nesymetrickou soustavu harmonických veličin rozložit na n mínus jedna symetrických složkových soustav vytvářející rotační magnetická pole a jednu, která je pulzující a rotační magnetické pole nevytváří. Nejnázornější je maticový zápis:

$$\begin{bmatrix} \hat{U}_{(0)} \\ \hat{U}_{(1)} \\ \hat{U}_{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \mathbf{a} & \mathbf{a}^2 \\ 1 & \mathbf{a}^2 & \mathbf{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{U}_A \\ \hat{U}_B \\ \hat{U}_C \end{bmatrix} \quad \text{kde:} \quad \begin{array}{l} \hat{U}_{(0)} \text{ je nulová (netočivá) složka;} \\ \hat{U}_{(1)} \text{ je sousledná složka;} \\ \hat{U}_{(2)} \text{ je zpětná složka.} \end{array} \quad (2.7)$$

* Symetrická trojfázová soustava je vždy vyvážená. Obrácené tvrzení však neplatí: vyvážená soustava nemusí být symetrická.

Matici odpovídá soustava rovnic:

$$\begin{aligned}\hat{U}_{(0)} &= \frac{1}{3} \cdot (\hat{U}_A + \hat{U}_B + \hat{U}_C) \\ \hat{U}_{(1)} &= \frac{1}{3} \cdot (\hat{U}_A + a \cdot \hat{U}_B + a^2 \cdot \hat{U}_C) \\ \hat{U}_{(2)} &= \frac{1}{3} \cdot (\hat{U}_A + a^2 \cdot \hat{U}_B + a \cdot \hat{U}_C)\end{aligned}\quad (2.8)$$

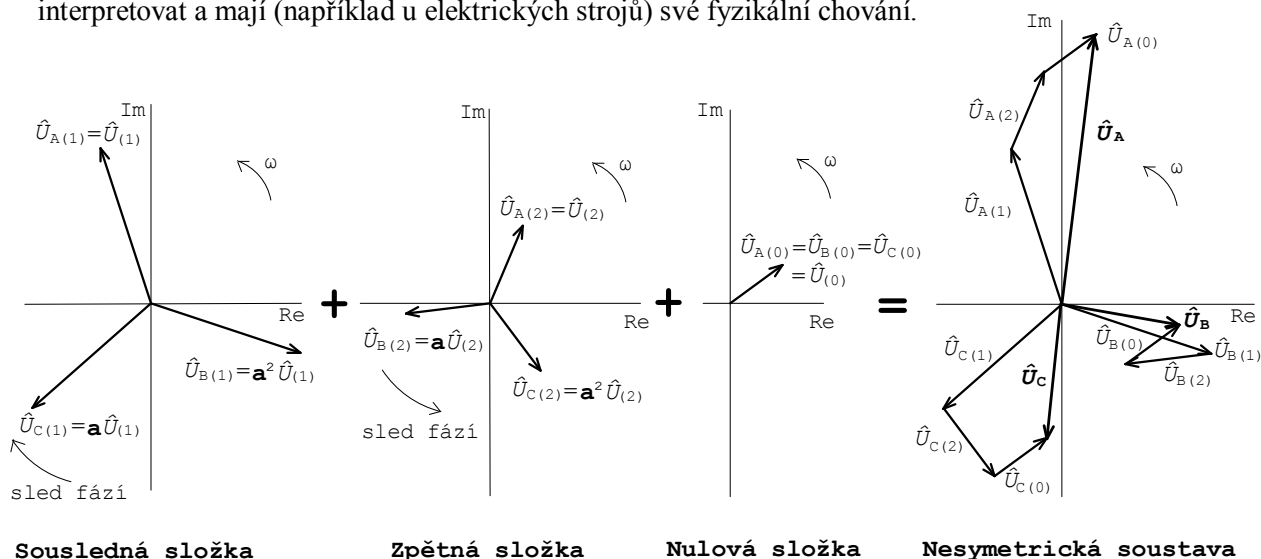
Pro zpětné zobrazení fázových hodnot platí:

$$\begin{bmatrix} \hat{U}_A \\ \hat{U}_B \\ \hat{U}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{U}_{(0)} \\ \hat{U}_{(1)} \\ \hat{U}_{(2)} \end{bmatrix}\quad (2.9)$$

a této matici odpovídá soustava rovnic (pro referenční fázi A):

$$\begin{aligned}\hat{U}_{(A)} &= \hat{U}_{(0)} + \hat{U}_{(1)} + \hat{U}_{(2)} \\ \hat{U}_{(B)} &= \hat{U}_{(0)} + a^2 \cdot \hat{U}_{(1)} + a \cdot \hat{U}_{(2)} \\ \hat{U}_{(C)} &= \hat{U}_{(0)} + a \cdot \hat{U}_{(1)} + a^2 \cdot \hat{U}_{(2)}\end{aligned}\quad (2.10)$$

Trojfázová nesouměrná soustava jakož i každá z jejích tří souměrných složek je v Gaussově rovině vyjádřena fázory, jimž přísluší komplexory (rotující fázory), které se zpravidla otáčejí v matematicky kladném smyslu úhlovou rychlostí ω kolem počátku. Sousedná složka má též sled fází jako daná nesouměrná soustava a zpětná složka má opačný sled fází. Nulová složka je tvořena třemi stejnými fázory a vzniká pouze v soustavách s uzemněným uzlem. Jednotlivé souměrné složky lze fyzikálně interpretovat a mají (například u elektrických strojů) své fyzikální chování.



Obr. 2.2 - Nesymetrická trojfázová soustava a její souměrné složky

Metoda souměrných složek umožňuje vyjádřit míru nesymetrie soustavy. Pro posouzení stupně nesouměrnosti se zavádí *činitel nesymetrie*. Je definován jako poměr zpětné složky k sousledné složce:

$$\text{pro napětí: } \rho_u = \frac{|\hat{U}_{(2)}|}{|\hat{U}_{(1)}|} \cdot 100 [\%] \quad \text{pro proud: } \rho_i = \frac{|\hat{I}_{(2)}|}{|\hat{I}_{(1)}|} \cdot 100 [\%] \quad (2.11)$$

Pro posouzení stupně nevyváženosti se zavádí *činitel nevyváženosti*. Je definován jako poměr nulové složky k sousledné složce:

$$\text{pro napětí: } v_u = \frac{|\hat{U}_{(0)}|}{|\hat{U}_{(1)}|} \cdot 100 [\%] \quad \text{pro proud: } v_i = \frac{|\hat{I}_{(0)}|}{|\hat{I}_{(1)}|} \cdot 100 [\%] \quad (2.12)$$

Trojfázová soustava, jejíž nulová složka se rovná nule, je soustavou vyváženou. (8)

V praxi je ovšem užitečné *stanovení činitele napět'ové nesymetrie bez rozkladu na souměrné složky* pomocí výrazu:

$$\rho_u = \sqrt{\frac{A - \sqrt{3 \cdot A^2 - 6 \cdot B}}{A + \sqrt{3 \cdot A^2 - 6 \cdot B}}} \quad (2.13)$$

přičemž „A“ a „B“ představují substituci:

$A = U_{AB}^2 + U_{BC}^2 + U_{CA}^2$ = součet kvadrátů efektivních hodnot jednotlivých sdružených napětí;

$B = U_{AB}^4 + U_{BC}^4 + U_{CA}^4$ = součet čtvrtých mocnin efektivních hodnot sdružených napětí.

Výše uvedený výraz umožňuje jednoduché experimentální zjištění číselné hodnoty činitele napět'ové nesymetrie, kdy pro jeho stanovení postačí zjistit efektivní hodnoty jednotlivých sdružených napětí, a to bez nutnosti zjišťování jejich fázové polohy. Tímto jednoduchým postupem je možno kontrolovat v napájecích stanicích plnění požadavku ze strany distributora elektrické energie na mezní hodnotu činitele napět'ové nesouměrnosti. Nezbytnou podmínkou pro realizaci uvedeného měření je přesnost měření, neboť ve výrazech „A“ i „B“ se vyskytují druhé a čtvrté mocniny. (4), (7)

Příčiny nesymetrie

Míra nesymetrie napětí v soustavě může být teoreticky určena všemi prvky, které se podílejí na výrobě, přenosu a spotřebě elektrické energie. Při normálním provozu je toto napětí určeno:

- Svorkovým napětím generátorů.
- Impedancí elektrického systému.

- Proudovým odběrem zátěží přes přenosovou a distribuční síť.

Systémová *napětí na straně generátorů* jsou vysoce symetrická z důvodu konstrukce a principu činnosti synchronních generátorů, které se používají v systémových elektrárnách. Z tohoto důvodu systémové elektrárny nepřispívají k nesymetrii. Dokonce s indukčními (asynchronními) generátory, jaké jsou používány v některých typech větrných elektráren, lze dosáhnout symetrického trojfázového napětí. Tam, kde jsou použity stále více populárnější výkonnostně malé generátorové jednotky, které jsou instalovány ve spotřebitelské síti a začíná narůstat jejich podíl ve výrobě elektřiny, je situace naprosto rozdílná. Mnoho z těchto relativně malých jednotek, jako jsou například fotovoltaické články, je připojeno do sítě nízkého napětí přes jednofázové elektronické střídače. Připojovací bod má relativně velkou impedanci (zkratový výkon je relativně malý), což vede k potenciální velké nesymetrii napětí a je to důvod pro připojení k vyšší úrovni napětí.

Impedance prvků elektrického systému není úplně stejná ve všech fázích. Geometrická konfigurace venkovních vedení, nesouměrnost vzhledem k zemi způsobí například rozdíly v elektrických parametrech vedení. Obecně tyto rozdíly jsou však velmi malé a jejich účinek může být zanedbán, pokud jsou učiněna preventivní opatření, jako jsou křížení vedení.

Ve většině praktických příkladů je *nesouměrnost zátěží* hlavním důvodem nesymetrie. Ve velmi vysokém a vysokém napětí jsou zátěže převážně trojfázové a symetrické, ačkoliv mohou být připojeny i velké jednofázové či dvojfázové zátěže, jako například střídavé vlakové trakce nebo obloukové pece, které pracují s nepravidelnými intenzivními elektrickými oblouky.

Nízkonapěťové zátěže jsou obvykle jednofázové, proto je obtížné garantovat symetrii mezi fázemi. V projektu elektrické sítě, která napájí tyto zátěže, jsou zátěže rozděleny do jednotlivých fází trojfázových systémů. I přesto symetrie náhradní zátěže na napájecím transformátoru kolísá z důvodu statistického rozptylu provozních cyklů různých individuálních zátěží.

Neobvyklé stavy systému také způsobí nesymetrii fází. Typickými příklady jsou zkrat mezi fází a zemí, mezi fázemi a nebo přerušení vodiče. Tyto poruchy způsobí poklesy napětí v jedné nebo více fázích a mohou také nepřímo způsobit přepětí jiných fází. Chování systému je potom nesymetrické, ale tyto jevy jsou obvykle klasifikovány jako náhodné poruchy, které jsou zpravidla rychle vypínány ochranami elektrické sítě.

Vzhledem k tomu, že první dvě uvedené příčiny nesymetrie napětí lze zanedbat, je za primární příčinu napěťové nesymetrie nutno považovat proudovou nesymetrii zátěže. Teprve průchod nesymetrických proudů způsobí na impedancích soustavy *napěťovou nesymetrii*. (9)

Důsledky nesymetrie

Citlivost elektrických zařízení na nesymetrii se liší zařízení od zařízení. Například u transformátorů nesymetrie způsobuje jejich zvýšený ohřev. Reakce na nulovou složku napětí závisí na zapojení primární a sekundární strany a zejména pak na přítomnosti středního vodiče. Pokud například jedna strana má trojfázové čtyřvodičové zapojení, nulové složky proudu mohou protékat. Pokud je na druhé straně vinutí zapojené do trojúhelníka, nulové složky proudů jsou transformovány do cirkulujících

(a teplo způsobujících) proudů v trojúhelníku. Sdružený magnetický tok prochází přes konstrukční části transformátoru. Jinými slovy nulová složka proudů způsobuje tzv. jednosměrnou magnetizaci jádra transformátoru, při níž se magnetický tok uzavírá přes nádobu transformátoru a způsobuje v ní ztráty vířivými proudy, což vede k jejímu oteplení.

Kabely a vedení jsou zatěžovány efektivní hodnotou celkového proudu, který se částečně skládá také z „neužitečných“ nesousledných složek proudu. Toto musí být bráno v úvahu při nastavování hranice účinnosti ochran, které reagují na celkový proud.

U *synchronních strojů* způsobuje nesymetrické zatížení nerovnoměrné oteplení statorového vinutí, a tím zmenšení výkonu při dovoleném oteplení vinutí.

U *asynchronních motorů* způsobuje nesymetrie přivedeného třífázového napětí rozdíly ve fázových proudech, které jsou asi pětinasobně větší, než jsou poměrné rozdíly mezi fázovými napětími. Smysl otáčení pole zpětné složky je opačný k poli sousledné složky. Proto, v případě nesymetrického napájení, celkové točivé magnetické pole bude „eliptické“ namísto kruhového. U strojů je snižován točivý moment vlivem brzdícího točivého momentu zpětné složky. Ložiska mohou být poškozena zvýšenými vibracemi vyvolanými točivými složkami s dvojnásobnou frekvencí.

Účinek na *měníče* se bude lišit v závislosti na typu výkonového obvodu a na použité metodě řízení. Obecně nejhůře na tom budou měniče, které napájejí kondenzátorové baterie, jelikož vrcholový proud je nesymetrický napětí značně zvětšen. (9)

Nesymetrie z hlediska norem

Jelikož trakční transformovny jsou připojeny k síti vvn, není možné při posuzování přípustné míry nesymetrie vycházet z normy ČSN EN 50160 (Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě), která uvádí hlavní charakteristiky napětí v místech připojení odběratelů z veřejných distribučních sítí nízkého a vysokého napětí za normálních provozních podmínek. Je však možné vycházet z PNE 33 3430-3 (Parametry kvality elektrické energie, část 3: nesymetrie napětí). Tato norma stanoví mezní hodnoty, výpočty a způsoby měření nesymetrie napětí a týká se charakteristik nesymetrie napětí v distribučních sítích nn, vn a vvn, a vytváří všeobecný podklad pro vyhodnocování a omezování nesymetrie napětí.

Pro připojování velkých nesymetrických zatížení zejména trakčních transformoven do sítě vvn se v normě uvádí, že pokud jednotlivé odběry průmyslových zařízení připojovaných mezi dvě fáze jsou zapojeny po dohodě s dodavatelem elektřiny (střídání fází), může být zařízení připojeno a uvedeno do zkušebního provozu pokud maximální příkon zařízení S_A splňuje následující podmínku:

$$S_K > 100 S_A$$

kde S_K je zkratový výkon sítě ve společném napájecím bodě.

Průmyslové zařízení připojené podle výše uvedené podmínky pak může být trvale provozováno, pokud za normálních provozních podmínek, v libovolném týdenním období, 95 % desetiminutových

středních efektivních hodnot R_{Sh} není ve společném napájecím bodu větší než 0,01. Přičemž R_{Sh} je zde definováno jako střední efektivní hodnota nesymetrie. Určení této střední efektivní hodnoty nesymetrie je zapotřebí provést zejména u rychle proměnných nesymetrických odběrů jako jsou obloukové pece a trakční odběry a platí:

$$R_{Sh} = \sqrt{\sum_{k=1}^M \frac{(\rho_U)_k^2}{M}} \quad (2.14)$$

kde M je počet měření a ρ_U je činitel napěťové nesymetrie vypočtený ze vztahu:

$$\rho_U = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (2.15)$$

Pro činitel β platí vztah:

$$\beta = \frac{U_{L1L2}^4 + U_{L2L3}^4 + U_{L3L1}^4}{(U_{L1L2}^2 + U_{L2L3}^2 + U_{L3L1}^2)^2} \quad (2.16)$$

kde:

U_{L1L2} je sdružené napětí mezi fázemi L1 a L2;

U_{L2L3} je sdružené napětí mezi fázemi L2 a L3;

U_{L3L1} je sdružené napětí mezi fázemi L3 a L1.

Celková doba sledování musí být alespoň jeden týden včetně soboty a neděle. Analýza by měla být prováděna na základě sumarizovaných dat ze dne na den. Měl by se brát v úvahu velký rozdíl, který se může vyskytnout mezi běžnými pracovními dny a dny konce týdne. Během týdenního časového intervalu T_{wk} se potom určuje, zda 95 % desetiminutových středních efektivních hodnot nesymetrie R_{Sh} změřených a vypočtených podle výše uvedených vztahů není větší než 0,02.

Jak je zde patrné, nesymetrie je měřena metodou tří voltmetrů, následně se vyhodnocují desetiminutové střední efektivní hodnoty nesymetrie R_{Sh} a nevyhodnocují se desetiminutové střední efektivní hodnoty zpětné složky, což by vyžadovalo použití speciálních filtrů pro přímé měření zpětné složky napětí.

Dokument *Pravidla provozování distribučních soustav – Příloha 3 – Kvalita elektřiny v distribuční soustavě, způsoby jejího zjišťování a hodnocení* (10) se k otázce nesymetrie staví takto:

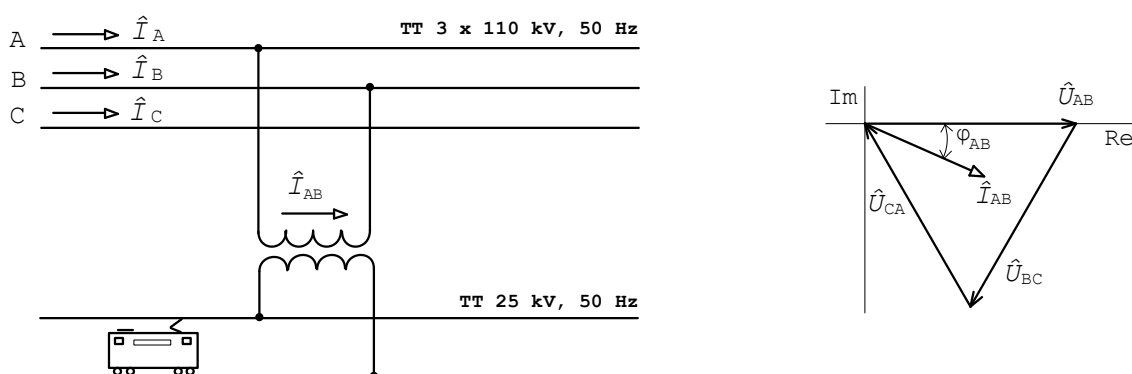
Za normálních provozních podmínek musí být během každého týdne 95 % středních efektivních hodnot zpětné složky napájecího napětí v měřicích intervalech 10 minut menší než 1,5 % sousledné složky. (V mezinárodních předpisech není pro hladinu vvn stanovena dovolená nebo plánovací úroveň pro zpětnou složku. Jako kompromis proto byla dohodnuta s provozovatelem přenosové soustavy hodnota 1,5 %, která představuje určitou rezervu pro zvýšení zpětné složky směrem k jejímu zdroji, tj. trakčním transformováním ČD připojovaným do sítí 110 kV distribuční soustavy.) Vzhledem k zjištěnému charakteru změn zpětné složky a možným důsledkům na činnost ochrany proti

nesymetrii se doporučuje rovněž sledovat a vyhodnocovat zpětnou složku pro měřicí interval 3 s. Nesymetrie napětí v daném časovém úseku T je definována za použití metody souměrných složek velikostí poměru zpětné složky napětí k sousledné složce, vyjádřené v procentech. Činitel ρ_U a β se počítá podle výše zmíněných vztahů. Není zde však definována střední efektivní hodnota nesymetrie R_{Sh} . Měřicí souprava musí vyhodnocovat nesymetrii v oknu 10 minut, pro výpočet se užije pouze základní harmonická. Všechny ostatní harmonické mají být vyloučeny filtry nebo algoritmem DFT.

2.2.2 Nesymetrie při provozu střídavé trakce 25 kV, 50 Hz

Nesymetrie zatížení všech tří fází sítě 110 kV, 50 Hz je základní konstrukční a fyzikální vlastností jednofázové trakční a proudové soustavy.

Připojení elektrické vozby 25 kV, 50 Hz k elektrizační soustavě jedním transformátorem v tzv. „T“ spojení



Obr. 2.3 - Schéma „T“ spojení a fázorový diagram proudových a napětových poměrů

Ze schématu zapojení je zřejmé, že v jednotlivých fázových vodičích tečou proudy:

$$\hat{I}_A = \hat{I}_{AB} \quad \hat{I}_B = -\hat{I}_{AB} \quad \hat{I}_C = 0 \quad (2.17)$$

Proudy složkových soustav:

$$\hat{I}_{(1)} = \frac{1}{3} \cdot (\hat{I}_A + a \cdot \hat{I}_B + a^2 \cdot \hat{I}_C) = \frac{1}{3} \cdot \hat{I}_{AB} \cdot (1 - a) \quad (2.18)$$

$$\hat{I}_{(2)} = \frac{1}{3} \cdot (\hat{I}_A + a^2 \cdot \hat{I}_B + a \cdot \hat{I}_C) = \frac{1}{3} \cdot \hat{I}_{AB} \cdot (1 - a^2)$$

pakliže $a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$; $a^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$, pak absolutní hodnoty složkových proudů:

$$|\hat{I}_{(1)}| = \frac{1}{3} \cdot I_{AB} \cdot \left| 1 - \left(-\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \right| = \frac{I_{AB}}{\sqrt{3}} \quad (2.19)$$

$$|\hat{I}_{(2)}| = \frac{1}{3} \cdot I_{AB} \cdot \left| 1 - \left(-\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \right| = \frac{I_{AB}}{\sqrt{3}}$$

Pro součinitel proudové nesymetrie platí:

$$\rho_i = \frac{|\hat{I}_{(2)}|}{|\hat{I}_{(1)}|} \cdot 100 = 100 \% \quad (2.20)$$

Toto zapojení způsobuje 100% proudovou nesymetrii bez ohledu na velikost a účinník proudu.

Z hlediska EMC je však důležitá znalost velikosti činitele napěťové nesymetrie (činitel proudové nesymetrie nemá vypovídající hodnotu). Pro jeho rychlé přibližné stanovení při jednofázovém odběru podle obr. 2.3 stačí znát výkon jednofázové zátěže a zkratový výkon sítě v místě připojení TNS. Vychází se ze vztahu:

$$\rho_u = \frac{U_{(2)}}{U_{(1)}} \cdot 100 = \frac{I_{(2)} \cdot Z_{(2)}}{U_{(1)}} \cdot 100 = \frac{I_{AB}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{Z_{(2)}}{U_{(1)}} \cdot 100 \quad (2.21)$$

a po úpravě zlomku výrazem v závorce:

$$\rho_u = \frac{I_{AB}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{Z_{(2)}}{U_{(1)}} \cdot \left(\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{U_{(1)}}{U_{(1)}} \right) \cdot 100 = \sqrt{3} \cdot U_{(1)} \cdot I_{AB} \cdot \frac{Z_{(2)}}{3 \cdot U_{(1)}^2} \cdot 100 \quad (2.22)$$

Výkon jednofázové zátěže se vypočte ze vztahu:

$$S_{1f} = U_{AB} \cdot I_{AB} \cong \sqrt{3} \cdot U_{(1)} \cdot I_{AB} \quad (2.23)$$

a souměrný třífázový zkratový výkon sítě v místě připojení:

$$S_{k3}'' = \frac{c \cdot U_v^2}{Z_k} \cong \frac{1 \cdot (\sqrt{3} \cdot U_{(1)})^2}{Z_{(2)}} \cong \frac{3 \cdot U_{(1)}^2}{Z_{(2)}} \Rightarrow \frac{Z_{(2)}}{3 \cdot U_{(1)}^2} \cong \frac{1}{S_{k3}''} \quad (2.24)$$

Po zpětném dosazení obou výkonů do (2.22) bude přibližný činitel napěťové nesymetrie:

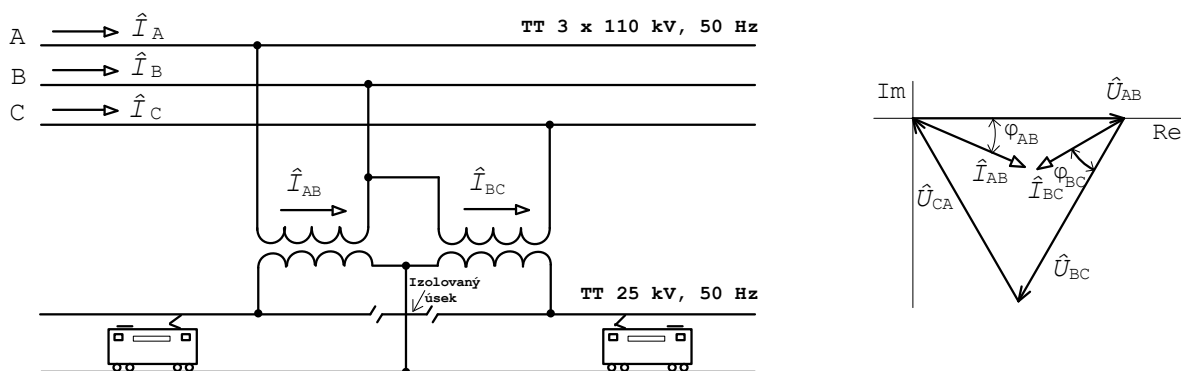
$$\rho_u \cong \frac{S_{1f}}{S_{k3}''} \cdot 100 \quad (\%) \Rightarrow S_{k3}'' \geq \frac{100}{\rho_u} \cdot S_{1f} \quad (2.25)$$

Bylo zde použito následujících zjednodušení:

- koeficient „c“ je roven jedné;
- vztažné napětí U_V je rovno napětí sousledné složky $U_{(1)} \cdot \sqrt{3}$
- pro celkovou impedanci Z_k mezi místem připojení TNS a všemi zdroji v soustavě, ve které převažují turboalternátory platí: $Z_k = Z_{(1)} \cong Z_{(2)}$ (7)

Připojení elektrické vozby 25 kV, 50 Hz k elektrizační soustavě dvěma transformátory v tzv. „V“ spojení

Jedná se o spojení dvou jednofázových transformátorů zapojených podle obr. 2.4.



Obr. 2.4 - Schéma „V“ spojení a fázorový diagram proudových a napěťových poměrů

Pro proudy tekoucí fázovými vodiči platí:

$$\hat{I}_A = \hat{I}_{AB} \quad \hat{I}_B = \hat{I}_{BC} - \hat{I}_{AB} \quad \hat{I}_C = -\hat{I}_{BC} \quad (2.26)$$

Proudy složkových soustav:

$$\begin{aligned} \hat{I}_{(1)} &= \frac{1}{3} \cdot (\hat{I}_A + a \cdot \hat{I}_B + a^2 \cdot \hat{I}_C) = \frac{1}{3} \cdot (\hat{I}_{AB} + a \cdot \hat{I}_{BC} - a \cdot \hat{I}_{AB} - a^2 \cdot \hat{I}_{BC}) = \\ &= \frac{1}{3} \cdot [\hat{I}_{AB} \cdot (1 - a) + a \cdot \hat{I}_{BC} \cdot (1 - a)] = \frac{1}{3} \cdot (1 - a) \cdot (\hat{I}_{AB} + a \cdot \hat{I}_{BC}) \end{aligned} \quad (2.27)$$

$$\begin{aligned} \hat{I}_{(2)} &= \frac{1}{3} \cdot (\hat{I}_A + a^2 \cdot \hat{I}_B + a \cdot \hat{I}_C) = \frac{1}{3} \cdot (\hat{I}_{AB} + a^2 \cdot \hat{I}_{BC} - a^2 \cdot \hat{I}_{AB} - a \cdot \hat{I}_{BC}) = \\ &= \frac{1}{3} \cdot [\hat{I}_{AB} \cdot (1 - a^2) - a \cdot \hat{I}_{BC} \cdot (1 - a)] = \frac{1}{3} \cdot (1 - a) \cdot [\hat{I}_{AB} \cdot (1 + a) - a \cdot \hat{I}_{BC}] \end{aligned}$$

Součinitel proudové nesymetrie:

$$\rho_i = \frac{|\hat{I}_{(2)}|}{|\hat{I}_{(1)}|} \cdot 100 = \frac{\left| \frac{1}{3} \cdot (1-a) \cdot [\hat{I}_{AB} \cdot (1+a) - a \cdot \hat{I}_{BC}] \right|}{\left| \frac{1}{3} \cdot (1-a) \cdot (\hat{I}_{AB} + a \cdot \hat{I}_{BC}) \right|} \cdot 100 = \frac{|\hat{I}_{AB} \cdot (1+a) - a \cdot \hat{I}_{BC}|}{|\hat{I}_{AB} + a \cdot \hat{I}_{BC}|} \cdot 100 \quad (2.28)$$

Z výše uvedeného vztahu je zřejmé, že u tohoto zapojení závisí velikost proudové nesymetrie jednak na velikosti odběrů, tedy proudů v úsecích a jednak na účínku na svorkách napájecí stanice. Hodnoty účínek jsou závislé na druhu hnacího vozidla a na režimu jízdy. Pohybují se v rozmezí od 0,6 (rozjezd) až do 0,85. V konečném důsledku lze konstatovat, že při stejném účínku obou odběrů bude se proudová nesymetrie u tohoto zapojení pohybovat od 50 % při stejném zatížení transformátorů až po 100 % při zatížení pouze jednoho transformátoru. V případě, že poměr velikostí obou odběrů je roven jedné a bude se měnit pouze účinek obou odběrů, může se proudová nesymetrie pohybovat od 0 % do 100 %. Nulovou hodnotu proudové nesymetrie je možné dosáhnout při vzájemném natočení fázorů odběrových proudů o úhel 60° ($\hat{I}_{AB} = \hat{I}_{BC}$; $\cos(\varphi_{AB}) = 0,5$; $\cos(\varphi_{BC}) = 1$), naopak 100% proudovou nesymetrii při jejich vzájemném natočení o úhel 180°. (7)

2.2.3 Prostředky pro zmírnění nesymetrie

Z výše uvedených skutečností vyplývají dvě zásadní možnosti pro zlepšení hodnoty činitele proudové (napěťové) nesymetrie. Jsou to:

- Zvýšení zkratového výkonu sítě v připojovacím bodě TNS k napájecí síti.
- Aplikace zařízení pro úplnou či částečnou symetrizaci odebíraného trakčního výkonu.

První možnost vychází ze vztahu (2.25) a o jejím použití rozhodují místní podmínky. Zkratové výkony (~ tvrdosti sítě) v napájecí třífázové distribuční soustavě jsou v dnešní době vzhledem k odběru elektrické trakce vysoké, tudíž jednofázové připojování trakčních odběrů s ohledem na dodržení limitu činitele napěťové nesymetrie $\rho_{\text{umax}} = 1,5$ % nepředstavuje vážnější problém i přesto, že ČD používají zpravidla zapojení trakčních transformoven podle schématu „T“ spojení, případně ve spojení „V“, kdy je nutné počítat se 100% proudovou nesymetrií. Vliv nesymetrie odběru se v podmínkách ČD tedy omezí připojením trakční transformovny v místě dostatečné úrovně zkratového výkonu v připojovacím bodě elektrizační soustavy. Připojení na jednotlivé fáze se určuje ve spolupráci s distributorem elektrické energie. Symetrizace, ve smyslu aplikace zařízení pro symetrizaci trakčního odběru popsaného dále, se u ČD neprovádí.

Druhá možnost přináší řadu řešení, lze je rozdělit na dva základní okruhy:

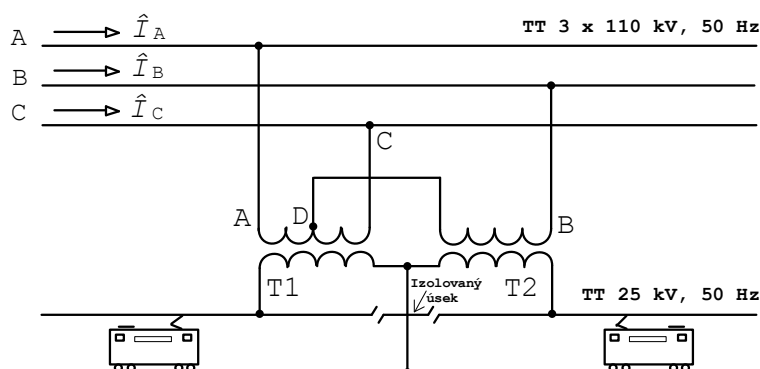
1. Použití speciálních konstrukcí trakčních transformátorů

Scottův transformátor (obr. 2.5) mění symetrickou třífázovou soustavu na symetrickou dvoufázovou soustavu. Jedná se v podstatě o spojení dvou jednofázových transformátorů. T1 má primární vinutí na síťové napětí (A-C) s vyvedeným středem vinutí D, který je připojen k primárnímu vinutí T2 a jehož

vývod je připojen k fázi B. Sekundární napětí i výkony obou transformátorů jsou stejné. Mezi oběma fázemi je sdružené dvoufázové napětí $25 \cdot \sqrt{2} = 35,3 \text{ kV}$, takže je nutné ve styku dělit trolejové vedení neutrálním polem. Při stejném výkonu v obou fázích se rozděluje součtový výkon dvoufázového systému rovnoměrně do všech tří fází na primární straně. Při rozdílném výkonu je poměrná proudová nesymetrie definována pomocí vztahu:

$$\rho_i = \frac{P_1 - P_2}{P_1 + P_2} \cdot 100 \quad (2.29)$$

kde P_1 a P_2 jsou současné výkony v obou fázích za předpokladu stejného napětí i účinníků obou výkonů. Toto zapojení se používá v zahraničí. (11)



Obr. 2.5 - Scottův transformátor

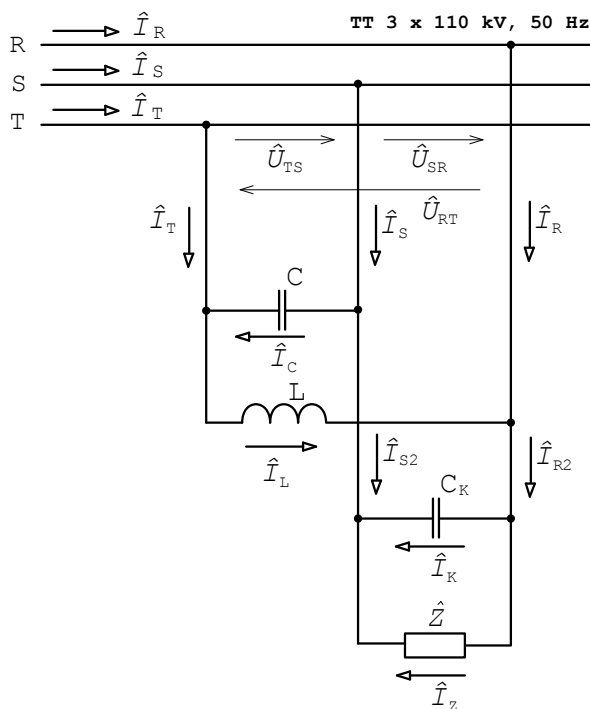
Další možností je transformátor s nesouměrným sekundárním vinutím spojeným do hvězdy. U jedné fáze této hvězdy je vyvedena odbočka nižšího napětí, která je spojena zpětným vedením s kolejí a je provedena tak, aby druhé dvě fáze zapojené na izolovaně oddělené úseky byly na sebe kolmé (podobně jako u Scottova zapojení). Rovněž zde při stejné jednofázové zátěži v obou úsecích zatěžuje tento transformátor primární síť symetricky.

Rovněž transformátor s vinutím ve spojení $Yd1$ nebo $Yd11$ vykazuje stejnou nesymetrii na primární straně jako při spojení dvou jednofázových transformátorů do „V“. Spojení do trojúhelníka na sekundární straně navíc omezuje harmonické řádů $3n$.

Existují i další konstrukční uspořádání, například *LeBlanc* nebo zapojení třífázového transformátoru s jednofázovým výstupem napětí (spojené sekundární vinutí do série), ale žádné z těchto zapojení neposkytuje dokonalou symetrizaci primárních proudů z čehož vyplývá závěr, že při jednofázovém dynamicky se měnícím odběru nelze dosáhnout úplné symetrizace primárních proudů pouhou kombinací vinutí transformátoru. (4), (7)

2. Použití symetrizačního zařízení

Nepříznivé působení nesymetrických spotřebičů na napájecí síť je rovněž možné eliminovat symetrizačními prvky. Jsou to kapacity a indukčnosti, které vhodným zapojením a nastavením (spotřebovávají minimální činný výkon) vedou k symetrickému zatížení napájecí sítě. Jednou z možností je *Steinmetzovo zapojení* (obr. 2.6). V základním provedení nevyužívá transformátor.



Pro proudy platí tyto vztahy:

$$\hat{I}_{R2} = \hat{I}_Z + \hat{I}_K$$

$$\hat{I}_{S2} = -\hat{I}_Z - \hat{I}_K = -\hat{I}_{R2}$$

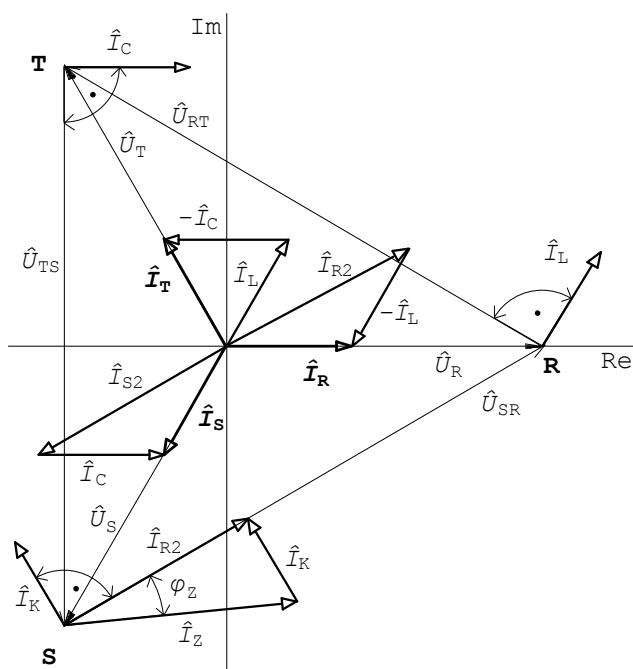
$$\hat{I}_R = \hat{I}_{R2} - \hat{I}_L$$

$$\hat{I}_S = \hat{I}_{S2} + \hat{I}_C$$

$$\hat{I}_T = \hat{I}_L - \hat{I}_C$$

$$|\hat{I}_L| = |\hat{I}_C| = \frac{|\hat{I}_{R2}|}{\sqrt{3}} \quad (2.30)$$

Obr. 2.6 - Steinmetzovo zapojení



Obr. 2.7 - Fázorový diagram Steinmetzova zapojení

Na sdruženém napětí mezi fázovými vodiči „S“ a „R“ je připojen trakční odběr představovaný impedancí \hat{Z} , u které se předpokládá induktivní charakter. Hodnoty prvků indukčnosti L a kapacity C závisí na hodnotě zátěže představované impedancí \hat{Z} , která, jak je zřejmé z fázorového diagramu (obr. 2.7), musí být kompenzována kapacitou C_K . To je podmínkou pro plnou symetrizaci. Steinmetzovo zapojení je využíváno například pro napájení britské části tunelu pod kanálem La Manche nebo v Queenslandu na severovýchodě Austrálie.

Závěrem lze konstatovat, že otázku nesymetrie nelze vyřešit pouze použitím speciálního transformátoru či transformátorové skupiny, protože není možné v trakčním provozu zajistit stejnou hodnotu zátěže současně v obou vývodech napájecího schématu. Možné řešení spočívá v uplatnění Steinmetzova principu používajícího dvou dodatečných reaktancí (indukčnosti a kapacity). Tyto ale musí být rychle regulovatelné, neboť trakční odběr je v čase značně proměnlivý. Předpokladem realizace Steinmetzova schématu je, že trakční výkon je odebírán s jednotkovým účínkem (nebo je na něj kompenzován) a že případné harmonické složky v odebíraném proudu jsou eliminovány před vstupem do symetrizačního obvodu samostatnými rezonančními LC větvemi. To vše vyžaduje regulaci LC prvků, respektive tyristorovou regulaci indukčnosti (kondenzátor je regulován pomocí paralelně zapojené tlumivky). Použití tyristorově regulované tlumivky vede ke vzniku dalších proudových harmonických se všemi lichými složkami spektra. Pokud by touto cestou vznikly na vstupní impedanci napájecí sítě nepřijatelné hodnoty harmonických napětí, bylo by zapotřebí instalovat další větev FKZ, avšak v trojfázovém provedení. (12)

2.3 Harmonické

Jak již bylo v kapitole 2.1 naznačeno, je dalším nepříznivým vlivem na napájecí soustavu deformace sinusovky odebíraného proudu, kterou způsobují nelineární prvky na straně zátěže. Následující kapitola přináší úvod do teorie dané problematiky.

2.3.1 Teoretický rozbor harmonických, jejich vznik a účinky

Pro popis periodických neharmonických průběhů mají zcela zásadní význam úvahy o skládání harmonických průběhů o nestejných kmitočtech. Významný je zejména případ, kdy jsou tyto kmitočty celočíselným násobkem kmitočtu základního. Obecně lze každou funkci, která je periodická [$f(t) = f(t + T)$] nebo periodicky prodloužitelná, rozložit v tzv. *Fourierovou řadu* (Fourier series) tzn. rozložit na součet periodických jednoduchých funkcí (elementární harmonické funkce sinus a kosinus). Aby bylo možné rozklad provést, musí funkce splňovat tzv. *Dirichletovy podmínky* (Dirichlet conditions):

- Uvnitř zadaného intervalu (jedné periody) musí být funkce alespoň po částech spojitá, tzn. může mít konečný počet bodů nespojitosti I. druhu.
- Uvnitř zadaného intervalu musí mít funkce konečný počet extrémů.
- Funkce musí být definována v krajních bodech intervalu, tzn. musí v nich nabývat konečných hodnot.

Je zřejmé, že pro skutečné obvodové veličiny jsou tyto podmínky vždy splněny. Pak lze funkci rozvést do Fourierovy řady:

$$\tilde{f}(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cdot \cos(n\omega_0 t) + b_n \cdot \sin(n\omega_0 t)] \quad (2.31)$$

kde:

$$a_n = \frac{2}{T} \cdot \int_{\alpha}^{\alpha+T} f(t) \cdot \cos(n\omega_0 t) dt \quad b_n = \frac{2}{T} \cdot \int_{\alpha}^{\alpha+T} f(t) \cdot \sin(n\omega_0 t) dt \quad (2.32)$$

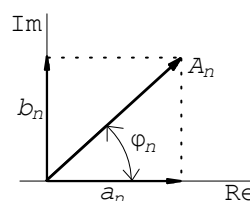
a speciálně pro $n = 0$ platí:

$$a_0 = \frac{2}{T} \cdot \int_{\alpha}^{\alpha+T} f(t) dt \quad (2.33)$$

Koeficient a_0 má význam stejnosměrné složky, složka o úhlovém kmitočtu ω_0 je *základní* nebo také *první harmonická*, ostatní složky s kmitočty $n\omega_0$ jsou *vyšší harmonické* a koeficienty a_n a b_n jsou složky amplitud jednotlivých harmonických složek (obr. 2.8)

a platí pro ně:

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad \varphi_n = \arctg \frac{b_n}{a_n} \quad (2.34)$$



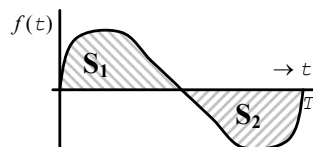
Obr. 2.8 - Geometrická interpretace koeficientů Fourierovy řady

Vzniklou periodickou funkci je možné charakterizovat parametry složek, z nichž se skládá. Závislost amplitud a počátečních fází těchto složek se nazývá *amplitudové a fázové spektrum*. Funkční hodnoty spekter jsou definovány pouze pro celistvé násobky základního kmitočtu ω_0 .

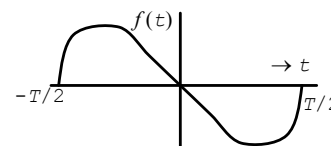
Obecně může mít součet harmonických podle vztahu (2.31) libovolný počet členů, ale v praktických výpočtech je nutné se omezit na konečný počet složek. Jejich součet se ovšem od původní funkce liší a představuje tedy jen její aproximaci.

Existuje několik pravidel pro zjednodušení výpočtu Fourierovy řady:

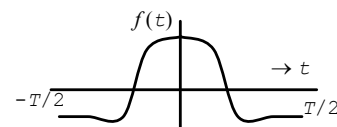
1. Funkce, u nichž se v intervalu $\langle 0, T \rangle$ plocha nad osou x rovná ploše pod osou x ($S_1 = S_2$), nemají stejnosměrnou složku, $a_0 = 0$.



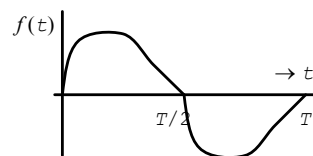
2. Funkce středově souměrné podle počátku [$-f(t) = f(-t)$], tzv. *liché* funkce, mají pouze sinové složky (b_n), všechny kosinové složky jsou nulové ($a_n = 0$).



3. Funkce osově souměrné podle osy y [$f(t) = f(-t)$], tzv. *sudé* funkce, mají pouze kosinové složky (a_n), všechny sinové složky jsou nulové ($b_n = 0$).



4. Funkce, jejichž průběh z první poloviny periody se v druhé polovině opakuje s opačným znaménkem, obsahují jen takové sinové a kosinové složky a_n , b_n , které mají pouze liché řady n (liché harmonické).

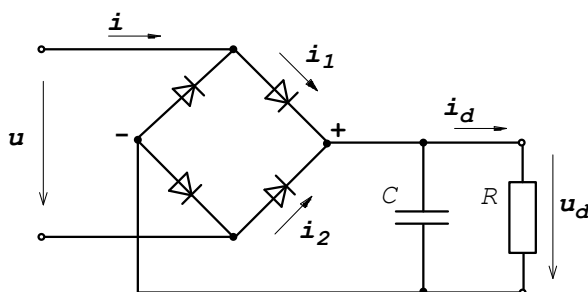


5. Funkce, jejichž průběh z první poloviny periody se v druhé polovině opakuje se stejným znaménkem, obsahují jen takové sinové a kosinové složky a_n , b_n , které mají pouze sudé řady n (sudé harmonické). Nulová je také první harmonická. (13), (14), (15)



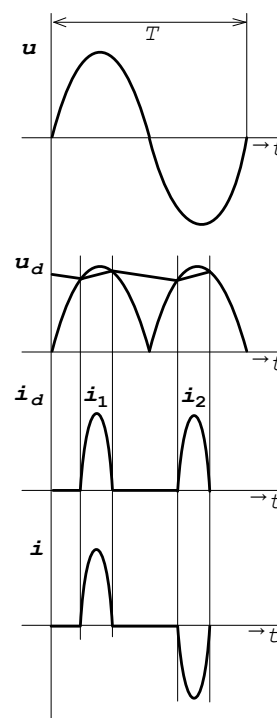
Vznik harmonických

V ideálně „čistém“ elektrickém systému má napětí i proud tvar čisté sinusovky. V jednoduchém obvodu, který obsahuje pouze lineární prvky (odpor, indukčnost a kapacitu), je proud, který jimi protéká, úměrný napájecímu napětí, takže pokud je napájecí napětí sinusové, bude protékat i sinusový proud. Voltampérová charakteristika zátěže, která vyjadřuje vztah mezi napětím a proudem, je tvořena přímkou. Pokud je v obvodu reaktanční prvek (indukčnost, kapacita), bude mezi průběhem napětí a proudu fázový posun, který sníží účinník, ale obvod zůstane stále lineární.



Obr. 2.9 - Dvoucestný usměrňovač v můstkovém zapojení s kapacitní zátěží

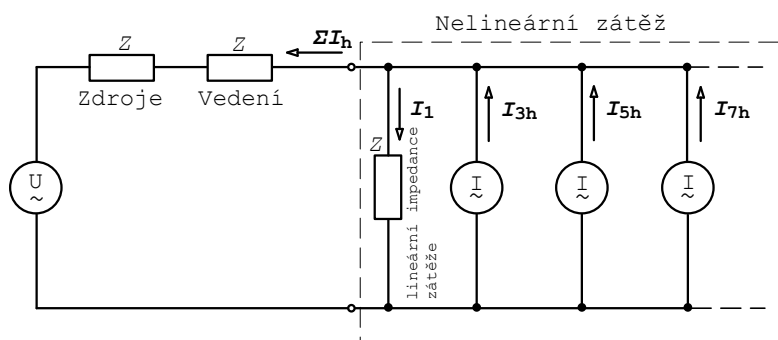
Na obr. 2.9 je jednoduchý dvoucestný usměrňovač s vyhlazovacím kondenzátorem. Toto zapojení představuje schéma běžně používaného stejnosměrného zdroje. V tomto případě zátěž odebírá proud ze sítě pouze tehdy, když napájecí napětí překročí napětí na kondenzátoru, tzn. u vrcholu sinusovky napájecího napětí. Napětí na přívodních svorkách usměrňovače je přitom sinusové. Trvání proudového impulsu se podstatně zkracuje ve srovnání s dobou impulsu při odporové zátěži. Proud má stejnou střední hodnotu, ale mnohem



Obr. 2.10 - Průběhy napětí a proudů z obr. 2.9

vyšší amplitudu (špičkový proud). Z průběhu napětí a proudů na obr. 2.10 je zřejmé, že se jedná o nelineární spotřebič, jehož voltampérovou charakteristikou není přímka. Navíc je patrné, že průběh proudu z první poloviny periody se opakuje v druhé polovině periody s opačným znaménkem a plochy nad i pod osou x jsou stejné, tudíž uvedený spotřebič bude generovat proudové harmonické lichého řádu bez stejnosměrné složky. Sudé harmonické se vzhledem k převládajícímu uplatnění dvoucestných usměrňovačů již vyskytují docela zřídka, ale v minulosti byly časté díky používání jednocestných usměrňovačů.

Nelineární zátěž je možné namodelovat jako lineární zátěž („spotřebovávající“ první harmonickou) s paralelně připojenými proudovými zdroji pro jednotlivé harmonické vyšších řádů (obr. 2.11). Harmonické proudy generovány zátěží, přesněji přeměněny zátěží ze základní harmonické proudu musí protékat obvodem přes impedanci vedení i impedanci zdroje – tečou tedy zpět ke zdroji energie. Deformovaný odběrový proud nelineární zátěže pak způsobuje zdeformované úbytky napětí na impedanci sítě a toto zkreslené napětí je využíváno pro všechny ostatní připojené zátěže a způsobuje průtok neharmonického proudu a to i v případě lineárních zátěží. (16)



Obr. 2.11 - Náhradní obvod nelineární zátěže

Zdroje harmonických

Harmonické proudy se v elektrických napájecích obvodech vyskytují již mnoho let. Na počátku byly generovány rtuťovými usměrňovači používanými například v trakčních měnících. Nyní s masivní aplikací polovodičových prvků ve všech oblastech elektrotechniky je situace týkající se emise, nebo, jinými slovy, kontaminace elektrické sítě harmonickými, značně horší. Harmonické proudy jsou generovány všemi nelineárními spotřebiči, kterými mohou být například:

- Spínané napájecí zdroje – používají se v elektronických jednotkách a nahradily tradiční redukční transformátory s usměrňovači. Jsou tvořeny přímo řízeným usměrňovačem, který nabíjí kondenzátor a ten pak napájí stejnosměrným proudem zátěž. Generují všechny liché harmonické.
- Elektronické předřadníky kompaktních svítidel – generují všechny liché harmonické.
- Trojfázové usměrňovače – zapojují se do trojfázového můstku a tvoří tzv. šestipulzní můstek, který generuje harmonické řádu $6n \pm 1$. Velikost každé harmonické je teoreticky nepřímo úměrná řádu harmonické ($I_n = I_1/n$). Použitím dvanáctipulzního můstku napájeného z transformátoru se dvěma sekundárními vinutími hvězda-trojúhelník a vzájemným fázovým posunem 30° se harmonické teoreticky redukuje na řády $12n \pm 1$.

- Další zařízení, například statické měniče frekvence, odporové, obloukové a indukční pece apod. Zdroji harmonických rovněž mohou být přechodové děje a poruchy v elektrizačních soustavách.

Mimoto se v sítích vyskytují *meziharmonické*, jejichž kmitočet je neceločíselným – zlomkovým násobkem základního kmitočtu a *subharmonické* – meziharmonické o nižším kmitočtu než základní. Jejich zdroji mohou být obecně rychlé změny proudů (amplitudově i změnou úhlu fázového posunu) v zátěžích při přechodových stavech, například obloukové pece na začátku tavby, motory s proměnlivým režimem, větrné elektrárny („stínící účinek“ sloupu) nebo asynchronní spínání polovodičových prvků ve statických měničích. (16)

Účinky harmonických

1. Problémy způsobené harmonickými proudy:

- Přetížení středního vodiče – pro první harmonickou je při stejném zatížení fází výsledný proud ve středním vodiči nulový. Pro harmonické řádu $3n$ to však neplatí, jejich amplitudy se ve středním vodiči aritmeticky sčítají a způsobují tak zatížení středního vodiče proudem, který může dosáhnout hodnoty až 1,73 násobku fázového proudu. S tímto faktem je nutné počítat při jeho dimenzování (v minulosti byly dimenzovány na poloviční zátěž).
- Přehřívání transformátorů – transformátory jsou harmonickými ovlivňovány dvojím způsobem. Za prvé nárůstem ztrát ve vinutích. Ztráty transformátoru se skládají ze ztrát naprázdno a při zatížení. *Ztráty naprázdno* vznikají vlivem střídavého magnetického pole v jádře, a ačkoliv magnetizační proud obsahuje harmonické, je extrémně nízký v porovnání se zatěžovacím proudem a jeho vliv na ztráty se neuvažuje. Ztráty při zatížení jsou tvořeny ztrátami ohmickými ($R \cdot I^2$), ztrátami vířivými proudy ve vinutí a rozptylovými ztrátami. *Ztráty ohmické* jsou úměrné druhé mocnině efektivní hodnoty proudu zátěže (včetně harmonických složek), ale nejsou závislé na frekvenci. Naproti tomu *ztráty vířivými proudy* závisí na druhé mocnině efektivní hodnoty proudu a dále na druhé mocnině frekvence harmonické řádu n podle vztahu:

$$\Delta P_V = \Delta P_{V,N} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left[\left(\frac{I_n}{I_N} \right)^2 \cdot n^2 \right] \quad (2.35)$$

kde:

$\Delta P_{V,N}$ - ztráty vířivými proudy při jmenovitém proudu a frekvenci (W);

I_n - proud harmonické řádu n (A);

I_N - jmenovitý proud (A).

Ztráty vířivými proudy lze omezit speciálním tvarem vodičů vinutí (průběžně permutovanými vodiči obdélníkového průřezu). *Rozptylové ztráty* vznikají vlivem rozptylových toků, které způsobují ztráty v jádře, ve svornících, nádobách a jiných ocelových částech a mohou zvyšovat teplotu v mechanických částech transformátoru a teplotu oleje. Rozptylové ztráty se

obtížně počítají a obvykle se předpokládá, že se mění s druhou mocninou proudu a frekvenci podle vztahu:

$$\Delta P_R = \Delta P_{R,N} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \left[\left(\frac{I_n}{I_N} \right)^2 \cdot n \right] \quad (2.36)$$

kde:

$\Delta P_{R,N}$ - rozptylové ztráty při jmenovitém proudu a frekvenci (W).

Druhý vliv je spojen s transformátory, které mají zapojení vinutí do trojúhelníka. Harmonické proudy řádů $3n$ se v takto zapojeném vinutí uzavírají a cirkulují, čímž vytvářejí přídavné zatížení. Na druhou stranu se tyto harmonické nešíří dál do sítě, takže transformátor působí jako izolační. Tentýž efekt se dosáhne při použití transformátorů v zapojení *lomená hvězda*.

- Přetěžování kompenzačních kondenzátorů – kompenzační kondenzátory jsou využívány ke kompenzaci fázového posunutí zpožděného proudu při induktivní zátěži. Připojují se paralelně k indukčnosti a vzhledem k tomu, že reaktance kapacitního prvku klesá úměrně s rostoucí frekvencí, budou se proudy vyšších harmonických uzavírat právě přes ně, a nepotečou do sítě, jejíž impedance je zpravidla induktivního charakteru, a tudíž s rostoucí frekvencí stoupá. Proto je kondenzátor více zatěžován harmonickými složkami proudů vyšších řádů a pokud není individuálně dimenzován, může dojít k jeho poškození. Tato vlastnost však bývá s výhodou využita v pasivních filtrech (viz následující kapitola).
- Nárůst chyb měřicích a jisticích přístrojů – mnohé přístroje potřebují pro svou činnost vyhodnocovat velikost protékajícího proudu. V případě, že jejich měřicí ústrojí není schopno korektně vyhodnotit a sečíst vyšší harmonické kmitočty, bude změřená efektivní hodnota a následně i jejich činnost nesprávná.
- Skinefekt – při vyšších kmitočtech má střídavý proud tendenci protékat okrajovou plochou vodiče. Pro základní kmitočet 50 Hz je tento jev obvykle zanedbáván, ale od sedmé harmonické, tzn. od 350 Hz, je již nutné s ním počítat, neboť způsobuje přídavné ztráty a oteplení. Zvýšený odpor i zvýšená reaktance (vlivem vyšší frekvence) mají za následek zvýšené úbytky napětí i napěťové zkreslení. (16)

2. Problémy způsobené harmonickými *napětími*:

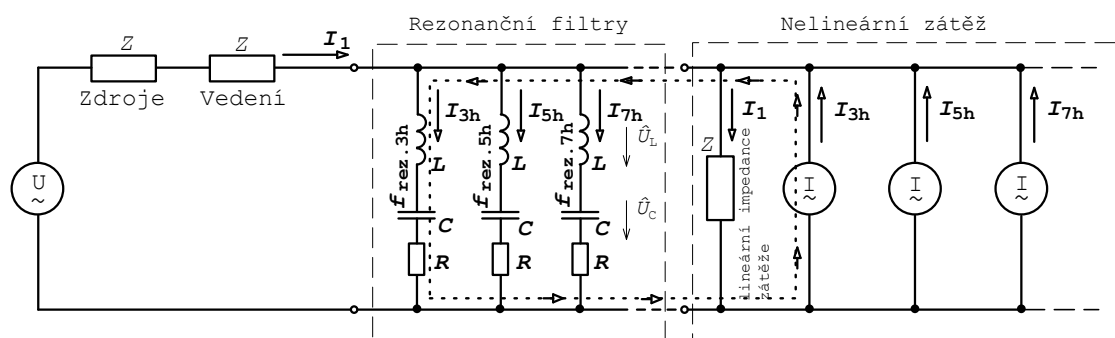
- Nárůst ztrát vířivými proudy u indukčních motorů – přídavné ztráty vznikají vlivem generování harmonických polí ve statoru, z nichž každé se pokouší otáčet motorem různou rychlostí dopředu nebo dozadu. Například pátá harmonická vytváří protisměrné rotační pole, zatímco sedmá harmonická vytváří rotační pole nad synchronní rychlostí motoru. Výsledkem jsou pulzy točivého momentu způsobující opotřebování ložisek i spojky. Proudů indukovaných do rotoru na vyšších kmitočtech dále zvyšují ztráty.
- Mnohé elektronické regulátory určují bod, kdy napětí prochází nulou, aby stanovily okamžik vypnutí zátěže. Je-li však napájecí napětí nesinusové, pak jsou změny napětí při průchodu nulou rychlejší a hůře identifikovatelné, nebo dokonce může být i několik průchodů nulou. To vede k nesprávnému chování regulátorů. (16)

2.3.2 Možnosti omezení harmonických

Existují v zásadě tři možnosti omezení harmonických. První již byla zmíněna výše a tvoří ji každý transformátor s vinutím zapojeným do trojúhelníka nebo lomené hvězdy, který izoluje harmonické řádů $3n$. Druhou možností je použití pasivních filtrů a třetí možností je aplikace aktivních filtrů.

Pasivní filtry

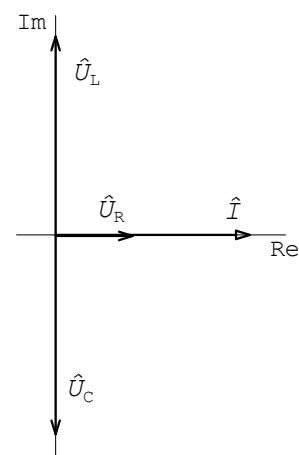
Pro filtrování harmonických proudů se používá *sériové zapojení* indukčnosti a kapacity (LC), které tvoří sací obvod. Tyto filtry se zapojují paralelně k zátěži (obr. 2.12).



Obr. 2.12 - Schéma filtrace harmonických proudů paralelními rezonančními filtry

Dva úbytky napětí na indukčnosti a kapacitě jsou vzájemně posunuty o 180° a při rezonanci mají stejnou velikost a vzájemně se vynulují (obr. 2.13). Velikost úbytku napětí na činném odporu (představuje odpor vinutí cívky a přívodního vinutí) je ve srovnání s úbytky napětí na LC členech zanedbatelná. Proto LC obvod představuje na rezonanční frekvenci pro danou harmonickou téměř zkrat, proud je omezen pouze činným odporem, uzavírá se a nešíří se dál do sítě, ale stále teče uvnitř instalace (obr. 2.12). Pro proud platí:

$$\hat{I} = \frac{\hat{U}}{\hat{Z}} = \frac{\hat{U}}{R + j(X_L - X_C)} \quad (2.37)$$



Obr. 2.13 - Fázorový diagram při rezonanci

při rezonanci platí:

$$X_L = X_C, \text{ tzn. } \frac{f_{\text{rez}}}{f_N} \cdot \omega \cdot L = \frac{1}{\frac{f_{\text{rez}}}{f_N} \cdot \omega \cdot C} \Rightarrow f_{\text{rez}} = \frac{f_N}{\omega \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad (2.38)$$

kde:

$$\omega = 2\pi \cdot f \quad \text{úhlová rychlost (rad} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$$

Poměr mezi rezonanční (f_{rez}) a jmenovitou (základní) frekvencí (f_N) lze definovat jako řád harmonické n_r :

$$n_r = \frac{f_{\text{rez}}}{f_N} = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}}, \text{ neboť} \quad (2.39)$$

$$n_r \cdot X_L = \frac{X_C}{n_r} \Rightarrow n_r^2 = \frac{X_C}{X_L} \Rightarrow X_L = \frac{X_C}{n_r^2} \quad (2.40)$$

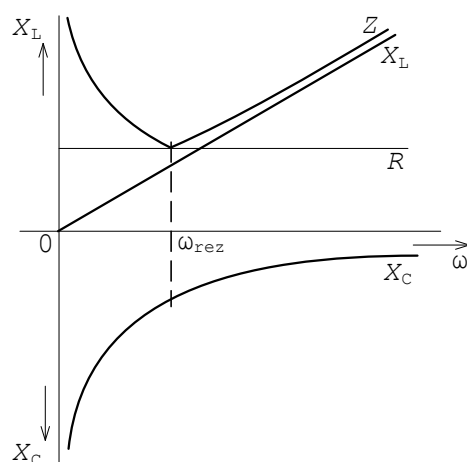
X_L a X_C jsou induktivní a kapacitní reaktance pro základní harmonickou. Po připojení sériového LC obvodu (s rezonanční frekvencí pro určitý řád harmonické n_r) na napětí základní harmonické U_1 , objeví se na kondenzátoru vyšší napětí než U_1 .

$$U_1 = U_{C1} - U_{L1} = (X_C - X_L) \cdot I = \left(X_C - \frac{X_C}{n_r^2} \right) \cdot I = \frac{n_r^2 - 1}{n_r^2} \cdot X_C \cdot I = \frac{n_r^2 - 1}{n_r^2} \cdot U_{C1} \quad (2.41)$$

pak napětí první harmonické U_{C1} na kondenzátoru bude rovno:

$$U_{C1} = \frac{n_r^2}{n_r^2 - 1} \cdot U_1 \quad (2.42)$$

Uvedená skutečnost má v praxi důležitý dopad. Pokud bude kompenzace tvořena pouze kondenzátory, což je ještě stále běžné v mnoha průmyslových podnicích, může indukčnost transformátorů a ostatních prvků sítě vytvářet s kompenzačními kondenzátory „náhodné“ rezonanční obvody, které mohou být vybuzeny některou z harmonických proudů v případě, že tyto frekvence budou blízké. Pak se ono zvýšené napětí objeví v celé instalaci za kapacitním prvkem a může ji poškodit (zejména citlivé polovodičové součástky). Nebezpečí vzniku rezonančního stavu odstraňuje tzv. *chráněná kompenzace*, což není nic jiného, než sériové předřazení tlumivky před kondenzátor. Vzniklý LC obvod je sice rezonanční, ale je „kontrolovaně“ naladěn tak, aby jeho rezonanční frekvence byla pod první existující harmonickou. Zvýšené napětí na kondenzátoru, který je na něj dimenzován, zůstane „uvnitř“ kompenzační sekce a neobjeví se v celé instalaci.



Z obr. 2.14 je zřejmé, že při frekvencích menších, než je rezonanční, má výsledná impedance kapacitní charakter, čehož se využívá pro kompenzaci první harmonické. (7), (16), (17), (18)

Obr. 2.14 - Frekvenční závislost prvků sériového rezonančního obvodu

Dimenzování filtrů

Každá filtrační větev je zatěžována proudem základní harmonické a proudem té harmonické, na kterou je naladěna. Celkový jalový výkon kondenzátoru bude:

$$Q = Q_{C1} + Q_{Cn} \quad (2.43)$$

přičemž pro jalový výkon základní harmonické platí:

$$Q_{C1} = \frac{I_1^2}{\omega_1 \cdot C} = U_{C1}^2 \cdot \omega_1 \cdot C \quad (2.44)$$

a pro jalový výkon n -té harmonické:

$$Q_{Cn} = \frac{I_n^2}{n_r \cdot \omega_1 \cdot C} = U_{Cn}^2 \cdot n_r \cdot \omega_1 \cdot C \quad (2.45)$$

Jalový výkon první harmonické je úměrný rostoucí kapacitě, naproti tomu jalový výkon od vyšších harmonických je nepřímo úměrný kapacitě. Pro běžnou praxi není výhodné určovat jalový výkon n -té harmonické z harmonického proudu či napětí. Vychází se proto z předpokladu, že:

$$Q_{C1} \geq 3 \cdot Q_{Cn} \quad (2.46)$$

Nutno počítat s tím, že kompenzační výkon základní harmonické celého filtru bude zmenšený o jalový výkon cívky.

$$Q_{\text{komp}} = Q_{C1} - Q_{L1} = U_{C1}^2 \cdot \omega_1 \cdot C - \frac{U_{L1}^2}{\omega_1 \cdot L} \quad (2.47)$$

Při použití substituce $a = \frac{n_r^2}{n_r^2 - 1}$, vyjádřením U_{L1} pomocí U_{C1} :

$$U_{L1} = U_{C1} \cdot \left(1 - \frac{n_r^2 - 1}{n_r^2}\right) = U_{C1} \cdot \left(\frac{1}{n_r^2}\right) = U_{C1} \cdot \left(1 - \frac{1}{a}\right) = U_{C1} \cdot \left(\frac{a - 1}{a}\right), \text{ úpravou uvedeného}$$

vztahu (2.40): $\omega_1 \cdot L = \frac{1}{\omega_1 \cdot C \cdot n_r^2} \Rightarrow \frac{1}{\omega_1 \cdot L} = \omega_1 \cdot C \cdot n_r^2$ a použitím vztahu:

$$U_{C1} = \frac{n_r^2}{n_r^2 - 1} \cdot U_1 = a \cdot U_1, \text{ lze rovnicí (2.47) napsat:}$$

$$\begin{aligned}
Q_{\text{komp}} &= a^2 \cdot U_1^2 \cdot \omega_1 \cdot C - a^2 \cdot U_1^2 \cdot \left(\frac{a-1}{a}\right)^2 \cdot \omega_1 \cdot C \cdot n_r^2 = \\
&= a^2 \cdot U_1^2 \cdot \omega_1 \cdot C \cdot \left(1 - \left(\frac{a-1}{a}\right)^2 \cdot \left(\frac{a}{a-1}\right)\right) = \\
&= a^2 \cdot U_1^2 \cdot \omega_1 \cdot C \cdot \left(1 - \frac{a-1}{a}\right) = a \cdot U_1^2 \cdot \omega_1 \cdot C
\end{aligned} \tag{2.48}$$

Tento výkon tedy představuje výkon celého filtru, ale napětí první harmonické na kondenzátoru bude vyšší a výkon na kondenzátoru bude:

$$Q_{C1} = a^2 \cdot U_1^2 \cdot \omega_1 \cdot C = a \cdot Q_{\text{komp}} \tag{2.49}$$

S ohledem na podmínku (2.46) tzn. dimenzování kondenzátoru na příslušnou vyšší harmonickou bude celkový výkon kondenzátoru:

$$Q_C = Q_{C1} + \frac{1}{3} \cdot Q_{C1} = \frac{4}{3} \cdot Q_{C1} = \frac{4}{3} \cdot a^2 \cdot U_1^2 \cdot \omega_1 \cdot C \tag{2.50}$$

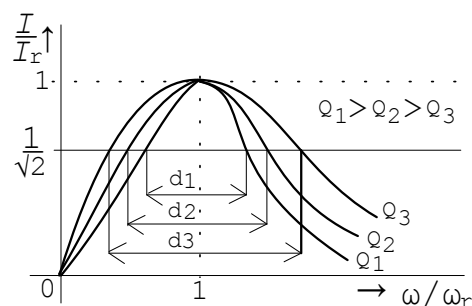
Důležitou vlastností filtru je, jak široké má pásmo propustnosti, které určuje „ostrost“ naladění filtru (obr. 2.15). Toto pásmo závisí na činiteli kvality filtru Q , který je dán jako poměr napětí na indukčnosti a napětí na odporu:

$$Q = \frac{U_L}{U} = \frac{U_L}{U_R} = \frac{\omega_{\text{rez}} \cdot L \cdot I_r}{R \cdot I_r} = \frac{\sqrt{L \cdot C}}{R} = \frac{\sqrt{C}}{R} = \frac{\rho}{R}, \tag{2.51}$$

kde

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}} \text{ je charakteristický odpor } (\Omega),$$

$$\frac{I}{I_r} \text{ je poměr proudu filtru k proudu při rezonanci.}$$



Obr. 2.15 - Normované rezonanční charakteristiky proudu

Jakost filtru je ve skutečnosti dána činným odporem tlumivky. Čím menší je tento odpor, tím užší je pásmo propustnosti a větší činitel jakosti Q , jinými slovy je strmější pokles celkové impedance filtru během přibližování se k rezonanční frekvenci. V praxi používané obvody pracují s $Q < 30$. Ostřejší ladění nemusí být výhodné, neboť změny indukčnosti a kapacity vlivem provozní teploty či stárnutí dielektrika by časem vedly k rozladění, tedy k posunutí jejich ostré rezonanční frekvence mimo potřebnou oblast. Další nevýhoda jejich ostrého ladění by se mohla projevit při jejich paralelní spolupráci. Často se používají paralelní sekce filtrů pro stejnou harmonickou z důvodu snížení jejich zatížení. Kdyby například došlo k posunutí rezonanční frekvence u jednoho z nich na 148 Hz, u druhého na 152 Hz, pak při 150 Hz (3. harmonická) by se první z nich jevil jako celek kapacitní a druhý jako induktivní. Vznikla by paralelní rezonance, která se naopak vyznačuje jako pásmová zádrž (velká impedance pro danou harmonickou), tudíž efekt filtru by byl zcela opačný.

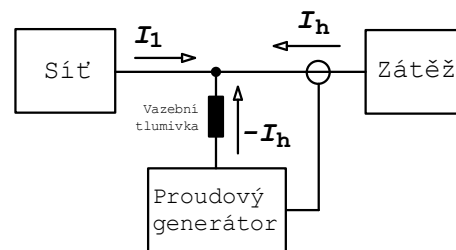
Účelem paralelního filtru využívajícího sériovou rezonanci je tedy snížit velikost harmonického proudu, který teče zpět do napájecí sítě, a tím i zkreslení způsobené harmonickými napětími. Za určitých okolností mohou být v síti použity i sériové filtry (paralelní rezonance) tvořící pásmovou zádrž. Nejčastěji se ladí na frekvenci signálů HDO, a tím zabrání jejich odsávání (zkratování). (7), (16), (17), (18)

Aktivní filtry

Jakýkoli pasivní filtr bude řešit pouze ty harmonické frekvence, na které je navržen, takže v případě, že se změní skladba harmonických, budou pasivní filtry málo účinné a budou se muset nahradit nebo doplnit. V některých instalacích je obsah harmonických málo předvídatelný a může se rychle měnit. Vhodným řešením filtrace harmonických je aplikovat *aktivní filtry*, které mohou být – stejně jako pasivní filtry – zapojeny do série, paralelně nebo kombinovaně a vylepšit tak napětí, proud nebo obojí. Princip aktivní filtrace je znám již delší dobu, pouze její technická realizace nebyla možná bez rychlých polovodičových součástek. Těmi jsou v poslední době zejména IGBT tranzistory, kterými lze realizovat filtrační zařízení s výkony řádově jednotek MV·A

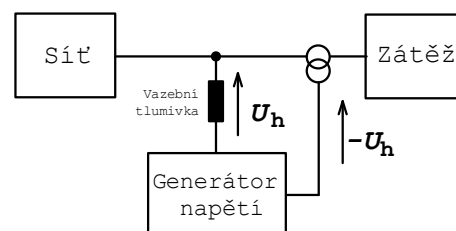
Paralelní aktivní filtr se zapojuje stejně jako pasivní filtry na obr. 2.16. Proud zátěže se měří proudovým transformátorem, jehož výstup je digitálně analyzován, aby se určil obsah harmonických. Tato informace je použita řízeným generátorem proudu, který generuje shodné harmonické proudy ale s opačnou fází a v příští periodě je zavádí do sítě. Z napájecí sítě je odebrán pouze proud první harmonické, protože vyšší harmonické proudy jsou „vyrobeny“ v aktivním filtru.

Takto je možné v každém okamžiku uskutečnit selektivní kompenzaci podle okamžitého výskytu harmonických složek bez nebezpečí, že dojde k nežádoucí rezonanci. Jestliže harmonické proudy vyvolané zátěží jsou větší než jmenovitý výkon aktivního filtru, pak filtr automaticky limituje jeho výstupní proud na maximální hodnotu a jakýkoli vyšší harmonický proud bude „doplňen“ z napájecí sítě – aktivní filtr nemůže být přetížen. Generováním jalové složky první harmonické proudu je paralelní aktivní filtr schopen velmi rychle provádět kompenzaci jalového proudu nebo pomocí sousledných a zpětných složek upravovat nesymetrickou zátěž na symetrickou. Pomocí řídicích algoritmů lze všechny tyto vlastnosti libovolně kombinovat.



Obr. 2.16 - Paralelní aktivní filtr

Sériový aktivní filtr (aktivní kondicionér) se zapojuje mezi svorky sítě a svorky spotřebiče. Je tvořen sériovým transformátorem a generátorem napětí (obr. 2.17). Účelem tohoto filtru je upravit přiváděné napětí na sinusový tvar. Filtr má rovněž schopnost udržovat amplitudu napětí, kompenzovat poklesy i špičky, zajišťovat symetrické rozložení napětí nebo také dodávat energii při výpadku napájecího napětí za podmínky, že je napájen nezávislým zdrojem. Aktivní kondicionéry se aplikují zejména tam, kde je připojena zátěž citlivá na kvalitu napájení.



Obr. 2.17 - Sériový aktivní filtr

Z výše uvedených způsobů obou zapojení je zřejmé, že paralelní filtry eliminují rušivé účinky zátěže, a tím chrání síť proti jejich vlivu, a sériové filtry chrání zátěž před vlivem sítě – dodávají zátěži kvalitnější napětí. (16), (17)

2.3.3 Definice výkonů a účinníku pro neharmonické průběhy

Pro neharmonické průběhy napětí a proudů je nutné definovat čtyři druhy výkonů:

1. *Činný výkon* (Active Power) je obecně definován jako střední hodnota okamžitého výkonu za dobu jedné periody:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad (2.52)$$

přičemž pro okamžitý výkon platí:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\omega t + \varphi) \cdot \sqrt{2} \cdot I \cdot \sin(\omega t) = U \cdot I \cdot \cos \varphi - U \cdot I \cdot \cos(2\omega t + \varphi) \quad (2.53)$$

kde φ je úhel fázového posunu mezi napětím a proudem v intervalu $\left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$

Z výše uvedeného vztahu je zřejmé, že okamžitý výkon má konstantní složku $U \cdot I \cdot \cos(\varphi)$, která se rovná činnému výkonu, a harmonicky proměnnou složku $U \cdot I \cdot \cos(2\omega t + \varphi)$, která kmitá s dvojnásobnou frekvencí a jejíž amplituda se rovná zdánlivému výkonu. V čase, kdy $p > 0$ bude spotřebič odebírat energii ze zdroje, a v čase, kdy $p < 0$ bude spotřebič vracet energii do zdroje.

Po dosazení $p(t)$ z rovnice (2.53) do rovnice (2.52) bude činný výkon:

$$P = U \cdot I \cdot \cos(\varphi) \quad (2.54)$$

a pro neharmonické průběhy napětí a proudů je definován jako součet činných výkonů příslušných efektivních hodnot harmonických:

$$P = \sum_{n=0}^{\infty} U_n \cdot I_n \cdot \cos(\varphi_n) \quad (2.55)$$

Činný výkon tedy dávají jen harmonické napětí a proudy téhož kmitočtu. Při uvažování čistě sinusového průběhu napětí se podílí na tvorbě činného výkonu pouze první harmonická proudů.

Fyzikální význam činného výkonu je zřejmý: je mírou elektrické energie, která se ve spotřebiči nevratně převádí na jiný druh energie (například tepelnou, světelnou nebo mechanickou). Jeho jednotkou je watt (W).

2. *Jalový výkon* (Reactive Power) je zpravidla definován jako součet jalových výkonů příslušných efektivních hodnot harmonických:

$$Q = \sum_{n=0}^{\infty} U_n \cdot I_n \cdot \sin(\varphi_n) \quad (2.56)$$

Střední hodnota okamžitého jalového výkonu je nulová. Pro harmonické průběhy představuje jeho fyzikální interpretace míru elektrické energie, která za jednotku času osciluje mezi zdrojem a spotřebičem. Přenos jalového výkonu způsobuje ve vedení Jouleovy ztráty a úbytky napětí, proto je snahou jej kompenzovat. Při neharmonických napětích a proudech nelze jalový výkon fyzikálně interpretovat – v energetické praxi má význam především jako empirická veličina pro posuzování poměrů při přenosu elektrické energie. Jeho jednotkou je voltampér reaktanční (V·Ar).

3. *Zdánlivý výkon* (Apparent Power) je definován jako součin efektivních hodnot harmonických napětí a proudů:

$$S = U_{\text{ef}} \cdot I_{\text{ef}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) \cdot dt} \cdot \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) \cdot dt} = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} U_n^2} \cdot \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} I_n^2} \quad (2.57)$$

Pro harmonické průběhy představuje maximální hodnotu činného výkonu, kterého by bylo dosaženo při účinnu $\cos \varphi = 1$. Pro neharmonické průběhy platí podobná výhrada, jako pro jalový výkon. Jednotkou zdánlivého výkonu je voltampér (V·A).

4. *Deformační výkon* (Distortion Power) představuje produkt vzniklý vyššími harmonickými a je tvořen napětími a proudy různého řádu:

$$D = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} [U_n^2 \cdot I_m^2 + U_m^2 \cdot I_n^2 - 2 \cdot U_n \cdot I_n \cdot U_m \cdot I_m \cdot \cos(\varphi_n - \varphi_m)]} \quad (2.58)$$

(Poznámka: někdy se tento výkon značí P_d).

Tento výkon je nulový, když napětí a proud obsahuje pouze stejné harmonické, přičemž fázový posun napětí a proudu jednotlivé harmonické je stejný a rovněž poměr napětí a proudu každé harmonické je stejný.

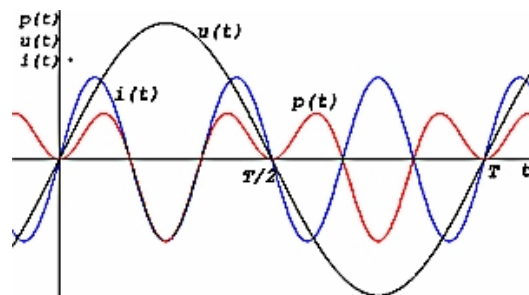
$$\varphi_n = \varphi_m \text{ a } \frac{U_m}{I_m} = \frac{U_n}{I_n} \quad (2.59)$$

Střední hodnota deformačního výkonu během jedné periody je rovna nule. Jedná se tedy o výkon newattový. Na obr. 2.18 je uveden příklad součinu napětí první harmonické a proudu třetí harmonické. Výpočtem je ověřeno (viz příklad na konci kapitoly), že výsledný průběh okamžitého výkonu (červeně) má nulovou střední hodnotu, tudíž nulový činný výkon a výsledný průběh výkonu $p(t)$ představuje deformační výkon ve smyslu výše uvedené definice.

Mezi jednotlivými druhy výkonů platí vztah:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (2.60)$$

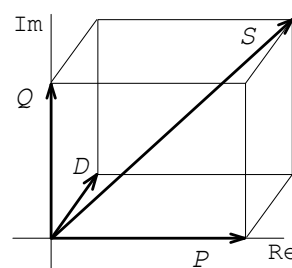
Existence harmonických zvyšuje zdánlivý výkon o deformační. Jednotkou je voltampér deformační [V·Ad]. Geometricky lze vztahy mezi jednotlivými výkony vyjádřit podle obr. 2.19. Tento výkon opět nemá fyzikální význam.



Obr. 2.18 - Průběh deformačního výkonu

Respektování deformačního výkonu vede k nutnosti definovat tzv. *skutečný (opravdový) účinník PF* (Power Factor), který se značí λ :

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} U_n \cdot I_n \cdot \cos(\varphi_n)}{\sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} U_n^2} \cdot \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} I_n^2}} \quad (2.61)$$



Obr. 2.19 - Vztahy mezi výkony

V praxi lze se setkat s pojmem *Činitel harmonického zkreslení THD* (Total Harmonic Distortion), který je definován pro proud i napětí a představuje celkové zkreslení proudu a napětí* :

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \cdot 100 \quad (\%) \quad THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U_1} \cdot 100 \quad (\%) \quad (2.62)$$

Z praktických důvodů součet n bývá omezen (například na $n = 40$ v normě ČSN EN 50160). (8), (15)

Příklad: Výpočet činného výkonu z průběhů napětí první harmonické a proudu třetí harmonické (průběh na obr. 2.18).

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u(t) \cdot i(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sin(t) \cdot \sin(3t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\cos(t-3t) - \cos(t+3t)}{2} dt = \\ &= \frac{1}{2 \cdot 2\pi} \int_0^{2\pi} \cos(t-3t) dt - \frac{1}{2 \cdot 2\pi} \int_0^{2\pi} \cos(t+3t) dt = -\frac{1}{2 \cdot 2\pi \cdot 2} \int_0^{2\pi} \cos(z) dz - \frac{1}{2 \cdot 2\pi \cdot 4} \int_0^{2\pi} \cos(w) dw = \end{aligned}$$

* V různých literaturách se lze setkat i s jinými definicemi THD.

$$\begin{aligned}
 &= -\frac{1}{2 \cdot 2\pi \cdot 2} \cdot [\sin(t - 3t)]_0^{2\pi} - \frac{1}{2 \cdot 2\pi \cdot 4} \cdot [\sin(t + 3t)]_0^{2\pi} = -\frac{1}{2 \cdot 2\pi \cdot 2} \cdot [\sin(-4\pi) - \sin(0)] - \\
 &-\frac{1}{2 \cdot 2\pi \cdot 4} \cdot [\sin(8\pi) - \sin(0)] = \underline{\underline{0}}
 \end{aligned}$$

Použité substituce a odvození:

$$* \quad t = x \ ; \ 3t = y$$

Funkce součtu argumentů:

$$\cos(x - y) = \cos(x) \cdot \cos(y) + \sin(x) \cdot \sin(y) \Rightarrow \sin(x) \cdot \sin(y) = \cos(x - y) - \cos(x) \cdot \cos(y) \quad [1]$$

$$\cos(x + y) = \cos(x) \cdot \cos(y) - \sin(x) \cdot \sin(y) \Rightarrow \sin(x) \cdot \sin(y) = -\cos(x + y) + \cos(x) \cdot \cos(y) \quad [2]$$

Rovnice [1] a [2] se sečtou:

$$2 \cdot \sin(x) \cdot \sin(y) = \cos(x - y) - \cos(x + y) \Rightarrow \sin(t) \cdot \sin(3t) = \frac{\cos(t - 3t) - \cos(t + 3t)}{2}$$

* *

$$z = t - 3t$$

$$w = t + 3t$$

$$dz = 1 - 3 = -2 \cdot dt$$

$$dw = 1 + 3 = 4 \cdot dt$$

$$dt = -\frac{dz}{2}$$

$$dt = \frac{dw}{4}$$

* * *

Zpětná substituce:

$$z = t - 3t$$

$$w = t + 3t.$$

Pohled do historie

Od roku **1888** byl znám vliv fázového posunu mezi napětím a proudem a byl uveřejněn průběh kmitajícího okamžitého výkonu s kladnými i zápornými hodnotami.

V roce **1891** poprvé používá Dolivo-Dobrovolsky pro část proudu nepodílející se na výkonu pojem „bezwattový proud“. Ve stejné době vzniká myšlenka kompensace fázového posunu pomocí kondenzátoru.

1892 - Heubach a Steinmetz narazili při pokusech s elektrickým obloukem a v roce **1905** při měření na dvojpulzním usměrňovači na

nesinusové proudy. Zjistili, že při stejném průchodu proudu a napětí nulou je faktor výkonu menší než jedna.

V roce **1893** byl za jednotku elektrického výkonu přijat Watt.

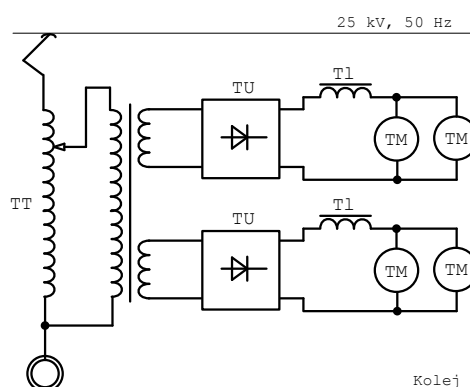
1894 - v příručce „Electric Transmission of Energy“ je uvedena známá rovnice pro výkon jednofázového střídavého proudu: $P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$ a pojem „faktor výkonu“.

Mezinárodní dohody o definicích elektrického výkonu bylo dosaženo v roce **1930** při zasedání IEC (International Electrotechnical Commission) v Norsku, kdy za jednotku jalového výkonu byl zvolen V·Ar (Volt-Ampere-Reactiv). (19)

2.3.4 Účinník a harmonické při provozu střídavé trakce 25 kV, 50 Hz

V době svého začátku byla jednofázová trakční proudová soustava považována za výhodnou především pro méně zatížené tratě. Tato myšlenka byla založena na tom, že trakční vedení vyžaduje menší průřez a napájecí stanice tvořené pouze jedním trakčním transformátorem mohou být od sebe ve větších vzdálenostech než měničny u stejnosměrné trakční proudové soustavy. Dodavatel elektrické energie tehdy kladl z hlediska EMC této trakční proudové soustavy pouze jedinou podmínku týkající se dovolené napěťové nesymetrie napájecí sítě 110 kV. Platilo, že trakční výkon nesměl přesáhnout 2 % zkratového výkonu napájecí sítě 110 kV v místě připojení napájecí stanice. ČSD mimo jiné i podle tohoto požadavku rozmístily své trakční transformovny.

Hnací vozidla v té době dodávala jako monopolní dodavatel Škoda Plzeň. Jednalo se o velké série hnacích vozidel používajících pro regulaci trakčního výkonu odbočkovou regulaci vozidlového transformátoru a neřízený jednofázový diodový usměrňovač v můstkovém provedení (obr. 2.20). Takto je řešen trakční obvod lokomotiv řady 230 (S 489.0), 240 (S 499.0). Posunovací lokomotivy řady 210 (S 458.0) a elektrické motorové vozy řady 560 (SM 488.0) byly vybaveny tyristorově položeným můstkem. Trakční napětí přichází na primární vinutí vozidlového transformátoru TT, který má 32 odboček přepínatelných pod zatížením. Z navolené odbočky se dílčí napětí přivádí na primární vinutí dalšího transformátoru s dvojicí sekundárních vinutí. Na každém sekundárním vinutí je připojen diodový můstkový usměrňovač TU, jehož výstupní proud prochází přes vyhlazovací tlumivku Tl na dvojici paralelně zapojených stejnosměrných sériových trakčních motorů TM téhož podvozku (lokomotivy vybavené tyristorově položenými můstky mají transformátor s pevným převodem a napětí na trakčních motorech se řídí postupným otevíráním sériově spojených můstků). Ve své době byla tato koncepce jedinou dostupnou odpovídající dosaženému stupni technického rozvoje.



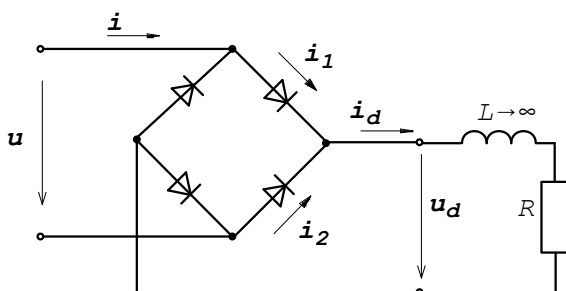
Obr. 2.20 - Schéma trakčního vozidla s diodovým usměrňovačem

Z hlediska dnešních požadavků EMC takto koncipována vozidla vykazují dva zásadní nedostatky, které však v době jejich vývoje a dodávek nebylo možné měnit, i když bylo již tehdy zřejmé, že

použité řešení není optimální. Účinnost odebraného výkonu se pohybuje v okolí hodnoty 0,84 a odebraný proud je značně deformován vyššími harmonickými. Přesné číselné hodnoty obou těchto veličin jsou závislé na vlastní koncepci trakčního obvodu a na okamžitém trakčním režimu.

Statický měnič na vozidle je tedy obecně vzato proudovým zdrojem vyšších harmonických ve smyslu schématu na obr. 2.11 na straně 40. Jelikož se jedná o měnič jednofázový v můstkovém zapojení, obsahuje spektrum jeho proudu odebraného na střídavé straně všechny harmonické lichého řádu a to jak sinové, tak kosinové členy, bez stejnosměrné složky (hnací vozidla s fázově řízeným můstkem obsahují spektrální složky stejných řádů, ale s podstatně většími hodnotami a s horším účinníkem). Efektivní hodnoty těchto harmonických složek se za obvyklých poměrů řídí *amplitudovým zákonem* ($I_n = I_1/n$). Výjimku tvoří na ČD lokomotivy dvousystémové s pulzním měničem řady 363, které jsou vybaveny speciálním obvodem pro stabilizaci vstupního napětí kondenzátoru stejnosměrného meziobvodu. Do jedenácté harmonické mají větší hodnoty než u diodového můstku, od jedenácté harmonické naopak menší. Vlivem nesymetrie reaktancí střídavé strany a vlivem náhlých změn trakčního režimu, doprovázených rychlými změnami výstupního proudu usměrňovače (odlišný tvar kladné a záporné půlperiody primárního proudu), se mohou ve spektru primárního proudu objevit i sudé harmonické. Jejich amplitudy jsou ovšem ve srovnání s lichými harmonickými podstatně menší. (20)

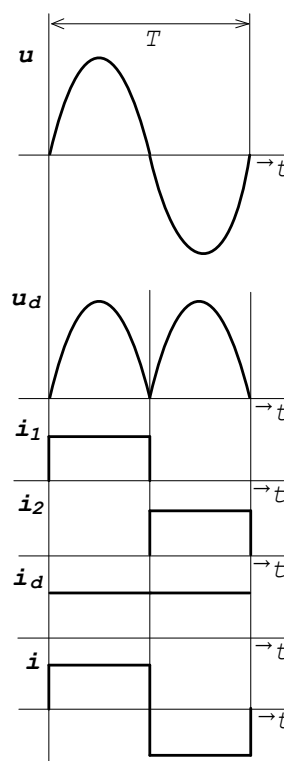
Na obr. 2.21 je schéma zapojení jednofázového dvoucestného usměrňovače v můstkovém zapojení a na obr. 2.22 jsou zobrazeny jeho průběhy napětí a proudů.



Obr. 2.21 - Dvoucestný usměrňovač
s indukční zátěží v můstkovém zapojení

U ideálního průběhu se předpokládá, že zátěž má nekonečně velkou indukčnost, zkratový výkon napájecí soustavy se blíží nekonečnu (tj. indukčnost soustavy je nulová) a na vstupu usměrňovače bude čistě sinusové napětí. Pak usměrněný proud i_d bude dokonale vyhlazený a proud na vstupu do usměrňovače i (proud tekoucí přes vozidlový a trakční transformátor do napájecí sítě) bude skokem střídavě nabývat kladných a záporných hodnot (obr. 2.22).

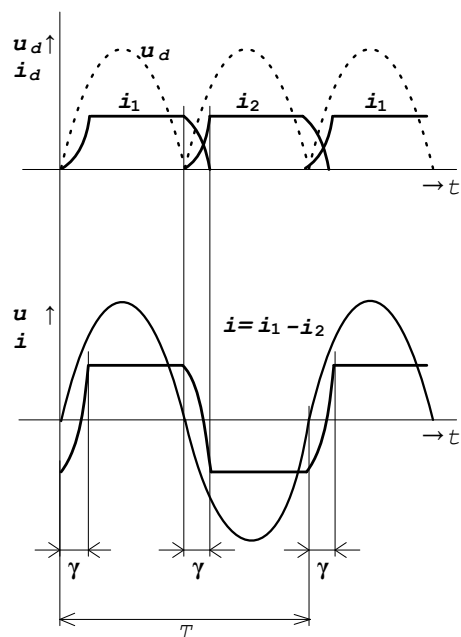
V reálném obvodu ovšem není možný takto kolmý nárůst ani pokles proudu po otevření či uzavření příslušných diod můstku. Nutno brát v úvahu rozptylovou indukčnost vozidlového transformátoru a reaktanci napájecí sítě (konečný zkratový výkon).



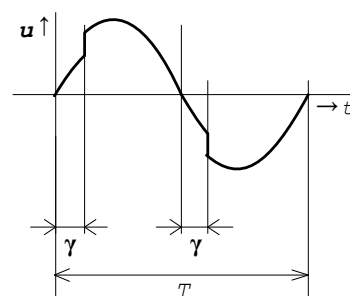
Obr. 2.22 - Průběhy napětí
a proudů z obr. 2.21

Na obr. 2.23 je zobrazen idealizovaný časový průběh napětí a proudu odebíraného hnacím vozidlem. Ve skutečnosti má průběh proudu mírně zvlněnou vodorovnou fázi, neboť indukčnost vyhlazovací tlumivky má konečnou hodnotu a průběh napětí je ovlivněn komutací (obr. 2.24). Úhel γ – *komutační úhel* nebo také *úhel překrytí* znamená stav, kdy diody si navzájem předávají vedení proudu. Je to doba, za kterou dosáhne proud i_2 hodnoty usměrněného proudu a proud i_1 klesne k nule. Během období komutace jsou všechny diody vodivé a transformátor je spojený nakrátko. Na výstupu usměrňovače se tento stav projeví jako úbytek napětí od komutace. Vůči trakční napájecí soustavě je takto krátkodobě vzniklý zkratový proud omezen rozptylovou reaktancí vozidlového transformátoru. Číselná hodnota této reaktance je závislá na zvolené odbočce primárního vinutí vozidlového transformátoru. V době komutace dochází ke krátkodobému poklesu napětí v trolejovém vedení a okamžik ukončení komutace diod se projeví jako přerušení tohoto zkratu strmým nárůstem napětí trolejového vedení (obr. 2.24).

Platnost výrazu $I_n = I_1/n$ je jen teoretická, neboť v praxi je obdélníkový průběh proudu „zkosený“ vlivem rozptylové reaktance napájecího transformátoru a spíše se podobá lichoběžníku, který se více přibližuje sinusovému průběhu, tudíž hodnoty amplitud harmonických budou menší, než udává amplitudový zákon (tab. 2), který počítá s obdélníkovým průběhem proudu. (20)



Obr. 2.23 - Idealizované časové průběhy napětí a proudu



Obr. 2.24 - Skutečný průběh napětí na trakčním vedení

Tab. 2 - „Amplitudový zákon“ pro průběh proudu z obr. 2.22 - procentní vyjádření harmonických

Řád harmonické n	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23
Amplituda v % základní harmonické $I_n = 100/n$	33,3	20	14,3	11,1	9,1	7,7	6,7	5,9	5,3	4,8	4,3

THD_I pro výše uvedenou tabulku je 46 %. Je nutné zdůraznit, že „amplitudový zákon“ platí pouze pro obdélníkový průběh (induktivní zatížení) a ne například pro průběh proudu při kapacitním zatížení, jak je uvedeno na obr. 2.10 na straně 39. Při tomto průběhu dosahuje THD_I až 140 %.

Praktickým měřením bylo zjištěno, že proudové harmonické produkované hnacími vozidly přecházejí z napěťové hladiny 25 kV do napájecí sítě 110 kV trakčním transformátorem (lze jej nahradit podélnou indukčností) prakticky pouze se snížením daným jeho závitovým převodem. Spektrum proudu procházejícího napájecí stanicí ČD obsahuje v dlouhodobém průměru (12):

- 3. harmonickou v hodnotě asi 25 % základní harmonické;
- 5. harmonickou v hodnotě asi 10 % základní harmonické;
- 7. harmonickou v hodnotě asi 5 % základní harmonické.

Výzkumem bylo rovněž potvrzeno (21), že při současném provozu více hnacích vozidel s diodovými trakčními měniči bude pro 3., 5. a částečně i pro 7. harmonickou proudu platit zákon jejich aritmetického sčítání. Důvodem je, že fáze těchto složek jsou do jisté míry nezávislé na trakčním režimu těchto vozidel. Složky vyšších řádů se již musí sčítat vektorově podle vztahu:

$$I_n = \sqrt{I_{nA}^2 + I_{nB}^2 + \dots + I_{nM}^2} \quad (2.63)$$

kde:

I_n je celkový proud n -té harmonické ($n \geq 7$),

$I_{nA\dots M}$ jsou harmonické proudy n -tého řádu jednotlivých hnacích vozidel.

Pakliže režimy hnacích vozidel budou přibližně stejné, lze vztah (2.63) zjednodušit, pro „M“ hnacích vozidel bude platit:

$$I_n = I_{nA} \cdot \sqrt{M} \quad (2.64)$$

Uvedená koncepce hnacích vozidel nedovoluje zásadní zlepšení výše zmíněných negativních vlivů přímo na vozidle bez totální demontáže všech prvků trakčního obvodu, a tudíž i neúměrné finanční náročnosti projektu. Jediným řešením je na straně hnacích vozidel přechod na modernější koncepci trakčního obvodu (vozidla se čtyřkvadrantovými měniči například řady 680 „Pendolino“ nebo řady 380) Tato vozidla vykazují vůči napájecí soustavě charakter lineárního spotřebiče se zanedbatelným spektrem proudových harmonických a hodnotu účinníku základní harmonické blízkou jedné. Druhou možností je použití filtračně kompenzačního zařízení umístěného v trakční transformovně. (4), (20)

Vlastní frekvence střídavé napájecí proudové soustavy

Spektrum harmonických proudů trakční transformovny nezávisí jenom na harmonických produkovaných trakčním vozidlem, ale i na konfiguraci napájeného trakčního obvodu. Hlavní prvky trakčního obvodu jsou tvořeny přírodním vedením napájecí soustavy, trakční napájecí stanicí, trakčním vedením a hnacími vozidly. První tři jsou složeny z indukčností a kapacit a to v podobě elektricky dlouhého vedení s rozprostřenými parametry (napájecí soustava a trakční vedení) a v soustředěné náhradní indukčnosti trakčního transformátoru. Hnací vozidlo je nutné chápat jako spotřebič činného výkonu na frekvenci 50 Hz a generátor proudových harmonických lichého řádu. Z teorie obvodů s LC prvky vyplývá, že každá taková soustava vykazuje jisté vlastní (rezonanční)

frekvence, jejichž hodnota závisí na konfiguraci obvodu, geometrických délkách trakčního vedení a na číselných hodnotách těchto prvků. Soustava pak tvoří elektrický obvod schopný kmitání, bude-li vhodně buzen.

Budícím prvkem je v tomto případě hnací vozidlo respektive některá z harmonických produkovaná tímto vozidlem anebo přerušení fiktivního zkratového proudu v sekundárním vinutí vozidlového transformátoru vlivem ukončení období komutace. Rezonanční frekvence soustavy nejsou nijak vázány na základní frekvenci 50 Hz či na její násobky. Pokud je rezonanční frekvence soustavy náhodně rovna některé z lichých harmonických produkovaných hnacím vozidlem, dojde k rezonančnímu zesílení této kmitočtové složky v proudu trakčního vedení, což bude mít vliv i na napěťové harmonické v připojovacím bodě trakční napájecí stanice i na konci trakčního vedení.

Rezonanční frekvence soustavy nezávisí na umístění hnacího vozidla v napájecím úseku, ale součinitel rezonančního zesílení je úměrný délce napájecího vedení a klesá při přibližování hnacího vozidla k trakční napájecí stanici. (4), (7)

2.3.5 Zlepšení účinníku a zmírnění harmonických střídavé trakce 25 kV, 50 Hz

Jak již bylo zmíněno, kromě deformace napájecího proudu, způsobují hnací vozidla s diodovými či tyristorovými usměrňovači i velké zahlcení napájecího proudu jalovou složkou proudu, tedy nízkou hodnotu účinníku, která se v průměru pohybuje kolem hodnoty 0,84. Přitom dodavatel elektrické energie požaduje, aby účinník základní harmonické se pohyboval v rozmezí 0,95 až 1 induktivního charakteru. Nedodržení této hodnoty je ze strany dodavatele penalizováno, proto ČD (ČSD) již v minulosti přistoupily k jeho kompenzaci (do roku 1989 byla běžně pro tehdejší ČSD výjimka ze závazné hodnoty účinníku udělována).

Kompenzace jalového výkonu

Ze samotné podstaty kompenzace – omezení jalového proudu v napájecím vedení – vyplývá, že je žádoucí umístit kompenzační zařízení co nejbližší ke spotřebiči, jehož jalový výkon má být kompenzován. V podmínkách ČD se tedy nabízí kompenzovat nízkou hodnotu účinníku přímo na hnacím vozidle, které toto snížení způsobuje. Toto řešení bylo výrobcem vozidel zkoušeno, ovšem narazilo na řadu obtíží. Prvním problémem bylo zvýšení hmotnosti těchto vozidel a problémy s prostorem ve strojovně. Druhým, daleko závažnějším problémem, bylo chování takto doplněného hnacího vozidla vůči trakční napájecí soustavě. Kompenzační kondenzátor totiž zcela zásadním způsobem změnil konfiguraci napájecí soustavy z hlediska její rezonanční frekvence. Došlo k jejímu snížení, a tím i zvětšení nebezpečí zesílit složky proudových harmonických nižších řádů, které mají podle „amplitudového zákona“ vyšší hodnoty. Hodnota rezonanční frekvence se stala závislou na poloze hnacího vozidla. Toto je nepřijatelný jev, proto bylo od myšlenky kompenzace účinníku přímo na hnacím vozidle upuštěno.

Druhou možností je umístit kompenzační zařízení na širé trati. Toto řešení bylo v minulosti zkoušeno ve dvou bodech na trati Plzeň – České Budějovice. Jednalo se o výkonový kondenzátor připínaný samočinně odpínačem po průjezdu hnacího vozidla bodem jeho umístění. Odpínač byl ovládán

elektromotorem a jeho pohyb byl vzhledem k sinusovce napětí trolejového vedení velmi pomalý. Z toho pramenil problém, že ke skutečnému elektrickému připojení kondenzátoru došlo ještě před mechanickým setkáním kontaktů, tedy přeskokem v časovém okamžiku, kdy sinusovka napětí trolejového vedení dosáhla své maximální hodnoty. Kondenzátor v okamžiku tohoto „připojení“ byl bez náboje a v zásadě způsobil zkrat trolejového vedení, čímž napětí v troleji pokleslo téměř k nule. Druhým problémem byl fakt, že kondenzátor byl připojen k elektricky dlouhému vedení s prvky LC , takže došlo k rozkmitání celé napájecí soustavy, což se projevilo superponováním kmitů vlastní frekvence na základní sinusovku napájecího napětí. Okamžitá hodnota dosahovala vlivem malých útlumů vrcholové úrovně $2 \cdot \sqrt{2} \cdot 27,5 = 77 \text{ kV}$, což se opakovalo několikrát v rytmu vlastní frekvence trakční napájecí soustavy, i když s klesající okamžitou vrcholovou hodnotou. Důsledkem tohoto přepětí byly závady na tehdy ještě germaniových diodách lokomotivních usměrňovačů. Kompenzační zařízení tohoto typu se neosvědčilo a bylo jej nutné demontovat.

Zbývalo jediné řešení a tím bylo umístění kompenzačního kondenzátoru přímo do trakční napájecí stanice. Rovněž zde však nastal problém, způsobený již výše zmíněnou komutací diod v lokomotivním usměrňovači. Na obr. 2.24 na straně 54 je znázorněn skutečný časový průběh napětí v trolejovém vedení se zvýrazněným napětovým skokem v době ukončení komutace. Tento strmý nárůst napětí vyvolal v kompenzačním kondenzátoru proudovou špičku, neboť proud kondenzátoru je úměrný rychlosti časové změny du/dt . Důsledkem uvedeného jevu bylo, že kompenzační kondenzátory i přes jejich poměrně malý jalový výkon byly neúměrně přetěžovány a hrozila jejich destrukce. Potvrdila se zde obecná skutečnost, že použití výkonových kondenzátorů v podmínkách časově zkresleného průběhu napájecího napětí, ať už harmonickými nebo právě komutačním jevem, je značně rizikové.

ČD po těchto neúspěšných pokusech ještě zkoušely doplnit kompenzační kondenzátor sériově zapojeným rezistorem, který měl omezit procházející proud, avšak cena za vzniklé činné ztráty v předřazeném rezistoru byla neúměrně vysoká. Stále by zde však zůstávala otázka regulace kompenzovaného jalového výkonu, neboť výkonové zatížení napájecích stanic je značně proměnlivé a případné překompenzování do kapacitního účinníku je ze strany dodavatele elektrické energie penalizováno.

V téže době se začínají objevovat první snahy dodavatele elektrické energie usilovat nejen o dodržení účinníku, ale i o omezení deformace napětí v připojovacím bodě trakčních napájecích stanic k přívodnímu vedení 110 kV. Jak se brzy ukázalo, bylo výhodné spojit kompenzaci účinníku a omezení harmonických společným novým zařízením, které by bylo instalováno v trakčních napájecích stanicích a řešilo by komplexně uvedené požadavky. Jedinou cestou byl návrh filtračně-kompenzačního zařízení. (4)

Filtračně-kompenzační zařízení (FKZ)

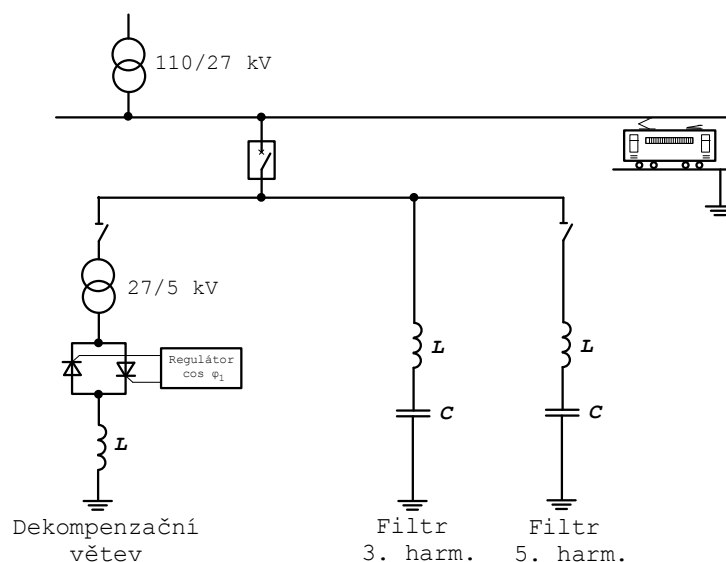
FKZ má v trakční napájecí stanici (TNS) zajistit tyto úkoly:

- Upravit induktivní účinník základní harmonické trakčního odběru hnacích vozidel jednofázové trakce v připojovacím bodě TNS na hodnotu 0,95 až 1 požadovanou dodavatelem elektrické energie.

- Zabránit přechodu hodnot tohoto účinníku do kapacitní oblasti.
- Omezit přestup proudových harmonických řádu 3 a 5, případně 7 tak, aby odpovídající složky v napětí připojovacího bodu TNS ležely pod mezními hodnotami předepsanými dodavatelem elektrické energie.
- Zajistit, aby vstupní impedance TNS jako celku (tj. včetně kapacity trakčního vedení a trakčního odběru hnacích vozidel) pro pracovní kmitočet soustavy HDO dodavatele elektrické energie splňovala jím požadovanou hodnotu, tj. zabránit snížení úrovně tohoto řídicího kmitočtu 216,67 Hz v připojovacím bodě TNS.

Tyto podmínky musí splněny v celém rozsahu trakčního zatížení TNS při dodržení principu, že napájené úseky TV jsou důsledně napájeny jednostranně.

FKZ využívá sériové rezonance LC prvků zapojených mezi přípojnici 27 kV a zpětné vedení. Tyto LC větve slouží k omezení valné části naladěných složek proudových harmonických tak, aby tyto nepostupovaly přes trakční transformátor do napájecí sítě, kdy by na impedancích způsobily vznik napěťových harmonických. Schéma FKZ je na obr. 2.25.



Obr. 2.25 - Schéma filtračně-kompenzačního zařízení

FKZ používané nyní u ČD obsahuje dvě paralelně řazené sériové LC větve pro 3. a 5. harmonickou*. Provedení FKZ umožňuje doplnění LC větví pro 7. harmonickou s podmínkou, že už při návrhu byla dekompenzační větev navržena pro toto doplnění. Je-li přivedená frekvence vyšší než rezonanční frekvence dané LC větve, pak se tato větev jako celek chová jako indukčnost. Je-li přivedená frekvence nižší než rezonanční, pak větev se chová jako kapacita. Uvedené skutečnosti se využívá pro kompenzaci účinníku první (základní) harmonické, protože pro ní se chovají kapacitně. Tento jev je dobře patrný z obr. 2.14 na straně 44. Kompenzační výkon obou větví je však konstantní (za předpokladu konstantního napětí) a je nezávislý na trakčním odběru, tudíž na potřebě kompenzačního

* V začátcích vývoje FKZ jeho řešení obsahovalo pouze jednu LC větev pro omezení 3. harmonické a tato větev byla spínána vakuovým vypínačem pouze v období, kdy byl požadován kompenzační výkon.

výkonu, který odpovídá aktuálnímu trakčnímu odběru. Jak již bylo výše zmíněno, je nutno kompenzovat na poměrně striktní hodnotu účinníku a to v reálném čase. Proto FKZ zahrnuje další větev zvanou „dekompensační“, která obsahuje snižovací transformátor* 27/5 kV nebo 27/6 kV, na jehož sekundární vinutí je přes tyristorový fázový regulátor připojena dekompenzační tlumivka, která „spotřebovává“ přebytečný jalový (kapacitní) výkon od obou LC větví a tím zabraňuje nežádoucí dodávce kapacitní jalové energie do sítě dodavatele. Větev musí být schopna dekompenzovat nejen kapacitu FKZ, ale v potřebném rozsahu i kapacitu přívodního vedení ve správě ČD a kapacitu připojeného trakčního vedení.

Celé FKZ je připojeno přes jednopólový vakuový výkonový vypínač na přípojnice 27 kV trakční transformovny. Větev pro 5. harmonickou a větev dekompenzační jsou vybaveny odpojovači. Větev pro 3. harmonickou je bez odpojovače, protože nesmí být odpojována, pokud má být v provozu větev 5. harmonické. (4), (5)

Ladění rezonančních větví FKZ

Při návrhu rezonančních LC větví nastal problém jejich přesného naladění. Z hlediska omezení harmonických ze strany trakčního vedení by se jevil optimální naladit obě tyto větve „ostře“, tzn. na 150 Hz a 250 Hz. Toto naladění by však vedlo k nutnosti nevhodného dimenzování kompenzačních kondenzátorů. Bylo totiž zjištěno, že napájecí napětí sítě 110 kV (bez trakčního odběru) obsahuje ve svém spektru liché harmonické a to zejména třetí. Jedná se o tzv. „elektrické pozadí“, na jehož vznik ani obsah nemají ČD jako uživatel elektrické energie vliv. Tyto harmonické složky by se dostaly přes trakční transformátor na LC a větve a přispěly tak k nadměrnému napětíovému namáhání kondenzátorů.

Z tohoto důvodu se neladí LC větev pro 3. harmonickou ostře tzn. na 150 Hz, ale těsně pod její úroveň, zpravidla na 145 Hz až 147,5 Hz. Použitím vztahů (2.39) a (2.42) lze provést následující úvahu:

LC větev pro 3. harmonickou je naladěna na rezonanční kmitočet 147,5 Hz. Řád harmonické n_r bude roven:

$$n_r = \frac{f_{rez}}{f_N} = \frac{147,5}{50} = 2,95$$

Po přivedení napětí základní harmonické U_1 na celou LC větev stoupne napětí na kondenzátoru na:

$$U_{C1} = \frac{n_r^2}{n_r^2 - 1} \cdot U_1 = \frac{2,95^2}{2,95^2 - 1} \cdot U_1 = 1,13 \cdot U_1$$

* Tento transformátor je zatěžován zcela specifickým režimem, neboť v případě, kdy TNS je zatížena trakčním odběrem (není potřeba dekompenzovat) má proud tekoucí tímto transformátorem vlivem tyristorové fázové regulace značné spektrum harmonických. Tyto způsobují jeho přidavné zatížení a musí se počítat s tím, že jeho jmenovitý výkon se přenásobí tzv. snižujícím činitelem 1/K.

což při napětí $U_1 = 27$ kV dává na kondenzátoru efektivní hodnotu přibližně 30,5 kV a maximální 43,1 kV. Kondenzátorové skupiny jsou dimenzovány na trvalé napětí 2×40 kV (dva kondenzátory v sérii) s možností krátkodobého přetížení, tudíž toto napětí je nemůže ohrozit.

Jiná situace bude po přivedení napětí 3. harmonické U_3 na LC větev. Napětí 3. harmonické na kondenzátoru bude:

$$U_{C3} = \frac{n_r^2}{n_r^2 - 1} \cdot U_3 = \frac{\left(\frac{147,5}{150}\right)^2}{\left(\frac{147,5}{150}\right)^2 - 1} \cdot U_3 = 29,25 \cdot U_3$$

Jak uvádí (4) napětí 3. harmonické, které tvořilo tzv. „elektrické pozadí“, dosahovalo průměrné hodnoty za dobu jednoho týdne 0,3873 % základní harmonické, tedy přibližně 0,105 kV. Ve výsledku by tato 3. napěťová harmonická přispěla zvýšením napětí na kondenzátoru o:

$$U_{C3} = 29,25 \cdot 0,105 = 3,07 \text{ kV}$$

což opět nepředstavuje z hlediska napěťového namáhání vzhledem k dimenzování kondenzátorů výrazný problém. Situace se však zcela změní, bude-li se naladění LC větve přibližovat k „ostrému“ naladění na 150 Hz. Hodnota n_r se bude blížit:

$$n_r = \lim_{f_{\text{rez}} \rightarrow 150} \frac{f_{\text{rez}}}{f_3} = \frac{150}{150} = 1$$

a napětí 3. harmonické na kondenzátoru bude:

$$U_{C3} = \lim_{n_r \rightarrow 1} \frac{n_r^2}{n_r^2 - 1} \cdot U_3 = \infty \cdot U_3$$

Z uvedeného výrazu je zřejmé, že v případě naladění LC větve na stejnou frekvenci jakou má přivedené napětí na jeho svorky, stoupne napětí této frekvence na kondenzátoru teoreticky neomezeně. V praxi nemůže tento násobek nabývat nekonečných hodnot, ale v každém případě je zřejmé, že takto naladěná větev by byla extrémně přetěžována.

Ladění LC větve FKZ těsně pod 150 Hz má ještě jeden důvod. Při částečném otevření regulátoru dekompenzační větve (tento produkuje všechny liché harmonické podle „amplitudového zákona“) dojde ke vzniku dodatečných harmonických v napětí přípojnice 27 kV. Sečtením obou 3. harmonických regulátoru a sítě 110 kV by mohlo dojít k přetížení LC větve 3. harmonické.

LC větev pro 5. harmonickou se ladí „ostře“ na 249 Hz až 250 Hz. Obsah harmonických pátého řádu se neprokával v napětí sítě 110 kV ani v proudu trakčního vedení v takové míře, aby svými hodnotami ohrozil prvky LC větví. (4), (22)

Zamezení útlumu signálu HDO

Systém hromadného dálkového ovládání (HDO) používá dodavatel elektrické energie pro své řídicí účely (spínání akumulčních spotřebičů, regulaci odběrů, změny tarifů). Jedná se o číslicový signál superponovaný na napětí rozvodné sítě. Ovládací frekvence HDO jsou pevně stanoveny a nesmí ležet poblíž některé z harmonických. Byly vybrány frekvence 167 Hz, 183,33 Hz, 216,67 Hz a 232 Hz.

Aby nedošlo k útlumu tohoto signálu v FKZ, požaduje dodavatel elektrické energie jistou minimální hodnotu vstupní impedance FKZ ($500\ \Omega$ až $900\ \Omega$). Tomuto požadavku lze vyhovět dvěma způsoby. Prvním je použití hradicového členu, který je zapojen do série s TNS a který je tvořen paralelním zapojením indukčnosti a kapacity (paralelní rezonance). Nevýhodou tohoto řešení je, že hradicový člen musí být dimenzován na plný příkon TNS, proto se u ČD nepoužívá. Druhou možností je využití skutečnosti, že mezi dvěma sousedními frekvencemi sériové rezonance leží vždy jedna paralelní rezonance, na které může impedance FKZ dosáhnout velmi vysokých hodnot.

Na většině území České republiky se používá ovládací frekvence 216,67 Hz (na jihu území, kde se používá střídavá elektrická trakce, je to ve 100 %), která leží mezi sériovými rezonancemi 150 Hz a 250 Hz, tj. 3. a 5. harmonickou. LC větev pro 3. harmonickou se jeví pro signál HDO jako indukčnost a LC větev pro 5. harmonickou se jeví vůči signálu HDO jako kapacita. Tato skutečnost dovoluje tedy nastavit frekvenci paralelní rezonance obou LC větví FKZ vhodnou volbou jejich výkonových prvků (kapacity kondenzátorových skupin a indukčnosti rezonančních tlumivek) tak, aby ležela v blízkosti ovládacího kmitočtu 216,67 Hz HDO.

Analýzou poměrů při připojení i odpojení trakčním vedení a při připojení dekompenzační větve se došlo k těmto závěrům:

- Pro FKZ s kompenzací 3. a 5. harmonické je základním údajem pro určení parametrů LC prvků obou větví kompenzační výkon celého FKZ (převážnou většinu tohoto výkonu poskytuje LC větev 3. harmonické). Pomocí této hodnoty se pak stanoví parametry ostatních prvků.
- Kapacita kondenzátorové skupiny LC větve 5. harmonické by měla dosahovat asi 25 % kapacity kondenzátorové skupiny LC větve 3. harmonické. Indukčnosti tlumivek obou větví jsou pak dány podmínkou sériové rezonance těchto větví na frekvencích 147,5 Hz a 250 Hz.
- Kapacita připojeného trakčního vedení a indukčnost dekompenzační větve ovlivňují především hodnotu kapacity LC větve pro 5. harmonickou.
- Do již vybudovaného FKZ pro 3. a 5. harmonickou nelze jednoduše dodatečně bez celkové rekonstrukce FKZ (v případě požadavku dodavatele elektrické energie) připojit další větev pro omezení 7. harmonické. Došlo by k poklesu vstupní impedance pod požadovanou minimální úroveň $500\ \Omega$.
- K podobnému nepříjemnému útlumu signálu HDO v síti 110 kV by došlo v případě, kdyby ovládací frekvence 216,67 Hz byla ze strany dodavatele změněna na 232 Hz.
- Avšak přechod na nižší ovládací frekvenci (167 Hz nebo 183,33 Hz) by nezpůsobil z hlediska dodržení minimální vstupní impedance potíže.
- Kdyby ovládací frekvence HDO ležela mimo interval rezonančních frekvencí obou větví, bylo by zapotřebí hledat jinou cestu zabránění jejího útlumu, například již výše uvedené použití hradicových členů. (4), (23)

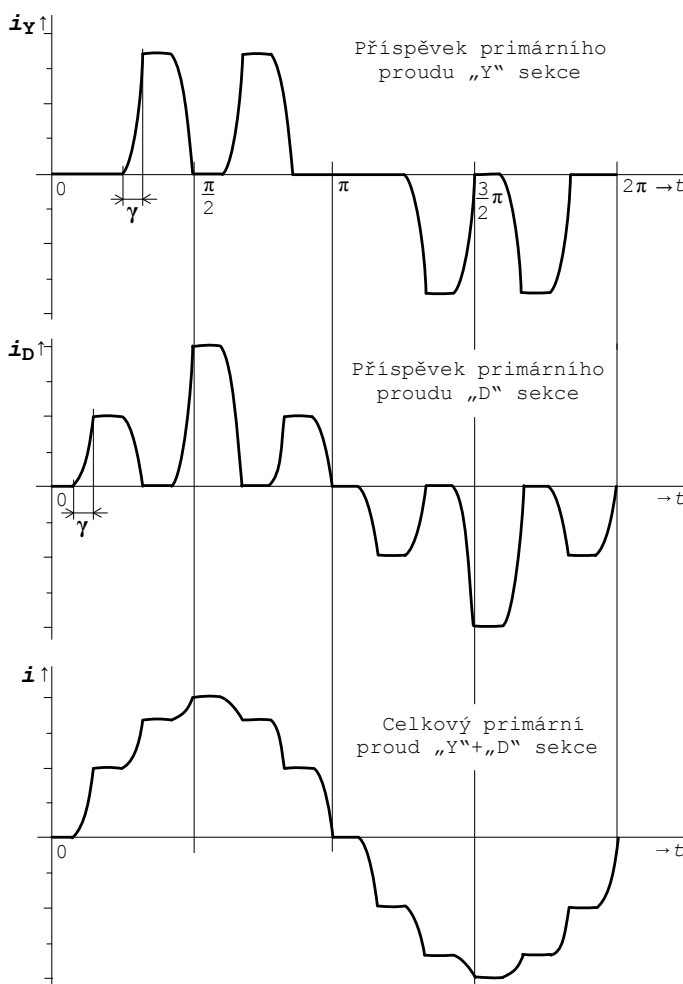
ČD řeší filtrací a kompenzací v TNS problémy svých zastaralých elektrických hnacích vozidel a vyhovuje tak požadavku dodavatele elektrické energie. Tímto ovšem neodstraňuje primární problém vzniku deformace sinusovky napájecího proudu. V západních zemích se FKZ v napájecích bodech jednofázové trakce běžně nebudují. Kvalita odběru elektřiny je tam základní podmínkou pro moderní lokomotivy a FKZ nejsou proto potřebná. (4)

2.3.6 Harmonické a účinník při provozu stejnosměrné trakce 3 kV

ČD používají v trakčních měnících usměrňovač ve dvojitěm trojfázovém můstku, což dává dvanáctipulzní usměrnění trakčního proudu (o schématu zapojení podrobněji pojednává kapitola 1.2). Původně toto schéma bylo zavedeno ze dvou důvodů: menší zvlnění výstupního napětí ve srovnání s tehdy běžným šestipulzním schématem a druhým důvodem bylo zvýšení využití sekundárního vinutí transformátoru usměrňovače, které je protékáno proudem dvakrát za periodu. V současné době je velkou předností tohoto zapojení fakt, že generuje do sítě proudové harmonické řádů $12n \pm 1$, to znamená, že první je až 11. harmonická.

V případě použití varianty s nulovou tlumivkou, zapojené mezi kladné vývody obou můstků, budou obě sekce komutovat samostatně, jako by se jednalo o dva šestipulzní usměrňovače. Nulová tlumivka se používala v začátcích elektrizace, schéma aktuálně používaných trakčních usměrňovačů tuto tlumivku nemá. Průběh proudů jednotlivých sekcí a výsledný primární proud je na obr. 2.26. Spektrální složení časových průběhů výsledného primárního proudu obou variant je shodné a nezáleží na tom, zda je či není použita nulová tlumivka, ačkoliv časové průběhy příspěvků obou sekcí jednotlivých variant se podstatně liší.

Složitě pochody během jednotlivých komutací proudu v diodách nedovolují analytické řešení. Díky tomu, že obě sekce nejsou odděleny nulovou tlumivkou, komutují vždy dvě diody různých můstků. Součtový primární proud vykazuje ve svém časovém průběhu za jednu půlperiodu tři oblasti komutace, kdy narůstá, a tři oblasti komutace, kdy klesá. (4)



Obr. 2.26 - Primární proudy dvanáctipulzního usměrňovače bez nulové tlumivky

Obsah harmonických

Poměrný obsah proudových harmonických je dán „amplitudovým zákonem“ za předpokladu, že výstupní proud bude mít obdélníkový průběh, to znamená, že usměrněný proud je dokonale vyhlazený nekonečnou hodnotou indukčnosti zatěžovacího obvodu a transformátor napájející usměrňovač má nulovou induktivní reaktanci. První předpoklad je do jisté míry splněn. Trakční obvod tvořený indukčností hnacího vozidla, podélnou indukčností trakčního vedení a na vývodu usměrňovače indukčností reaktoru pro omezení strmosti zkratových proudů poskytuje induktivní charakter zátěže a ve výsledku mírně zvlněnou vodorovnou fázi usměrněného proudu. Druhý předpoklad nemůže být splněn, neboť reálný transformátor má rozptylovou reaktanci představovanou napětím nakrátko u_k (napájecí síť má v porovnání s výkonem měničny mnohonásobně větší zkratový výkon a tak do jisté míry splňuje předpoklad „amplitudového zákona“). Nelze proto na uvedený případ aplikovat „amplitudový zákon“, ale s jistotou lze konstatovat, že poměrný obsah proudových harmonických bude menší, než udává „amplitudový zákon“, což je patrné z obr. 2.26 představující celkový primární proud transformátoru, který se značně podobá sinusovému průběhu.

Úhel překrytí

Jelikož trakční odběr představuje RL zátěž, bude tvar odebíraného proudu podobný, jako na obr. 2.23 na straně 54. Z hlediska vlivu trakčního usměrňovače na napájecí síť 22 kV se uplatňuje především úhel překrytí γ fázových proudů trakčního usměrňovače. Jak již bylo uvedeno, vlivem rozptylové indukčnosti transformátoru a konečné hodnoty zkratového výkonu napájecí sítě nebude mít proud obdélníkový průběh, a tudíž bude existovat jev komutace, během kterého dochází k předávání vodivosti komutujících diod. Jevo komutace rovněž způsobí existenci fázového posunu mezi napětím a proudem na primární straně transformátoru, a tím určitou hodnotu účinníku základní harmonické $\cos \varphi_1$. Na obr. 2.27 je zobrazen detail dvou komutujících diod. Schéma i značení proudů a napětí je shodné s obr. 2.21 na straně 53, kde u a i značí časový průběh napětí a proudu na vstupní straně usměrňovače, i_1 a i_2 jsou proudy komutujících diod. Je zde patrný vznik fázového posunu φ_1 vlivem úhlu překrytí. Úhel překrytí γ je pro dvanáctipulzní usměrňovač dán výrazem (4):

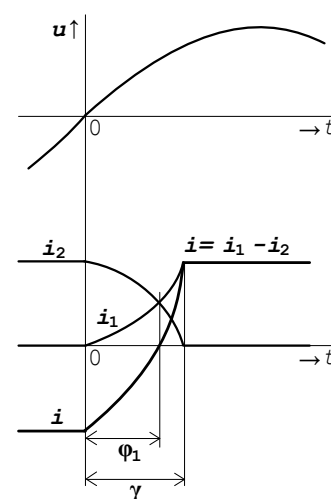
$$\cos(\gamma) = 1 - \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot X_A \cdot I_{DC}}{U_2} \quad (2.65)$$

kde:

X_A je rozptylová reaktance transformátoru usměrňovače (Ω),

I_{DC} je hodnota usměrněného proudu (A),

U_2 je efektivní fázová hodnota napájecího napětí tj. sekundárního vinutí transformátoru (V).



Obr. 2.27 - Detail komutujících diod

Při předpokladu konstantního napájecího napětí závisí hodnota úhlu překrytí na rozptylové reaktanci transformátoru a na zátěžném proudu.

Souvislost mezi velikostí úhlu překrytí a účínkem základní harmonické

Z obr. 2.27 lze vysledovat, že větší úhel překrytí (nárůst zatěžovacího proudu) bude znamenat pokles účínku základní harmonické. Tuto závislost lze vyjádřit přibližným vztahem (24):

$$\varphi_1 \cong \left(\frac{1}{2} \div \frac{2}{3} \right) \cdot \gamma \quad (2.66)$$

Hodnoty úhlu překrytí se u trakčních usměrňovačů ČD při jmenovitém zatížení pohybují mezi 22 až 25 elektrickými stupni. Je tedy zřejmé, že účinek základní harmonické se bude pohybovat spolehlivě nad požadovanou hodnotou 0,95 a bude mít zásadně induktivní charakter. Pouze výjimečně může dojít k přechodu do oblasti kapacitního účínku a to tehdy, jestliže usměrňovač bude pracovat na stejnosměrné straně naprázdno a zároveň jeho přepět'ové ochrany, které jsou tvořeny RC členy na sekundárních vinutích transformátoru, budou dodávat jalový kapacitní výkon větší, než je jalový induktivní výkon naprázdno pracujícího transformátoru. (4)

Souvislost mezi velikostí úhlu překrytí a poměrným obsahem harmonických

Úhel překrytí lze považovat za jistou míru stupně zatížení usměrňovače. Ze vztahu (2.65) vyplývá, že úhel překrytí roste s narůstajícím zatížením. Při pohledu na obr. 2.27 je zřejmé, že větší úhel překrytí bude pro zobrazený tvar časového průběhu proudu znamenat vzdalování se od obdélníkového tvaru a přibližování se přes méně strmou náběžnou a odběhovou hranu lichoběžníka k více „zaoblenému“, tedy sinusovému tvaru. Důsledkem toho primární proud vykazuje mnohem menší poměrné hodnoty harmonických, než určuje „amplitudový zákon“. Naopak nulový úhel překrytí znamená zanedbání jevu komutace a poměrné hodnoty harmonických odpovídající „amplitudovému zákonu“. Z toho vyplývá, že s rostoucím zatížením usměrňovače dochází k poklesu procentních hodnot harmonických.

Z výše uvedených skutečností lze chování trakčního usměrňovače z hlediska nepříznivých vlivů na napájecí soustavu shrnout takto:

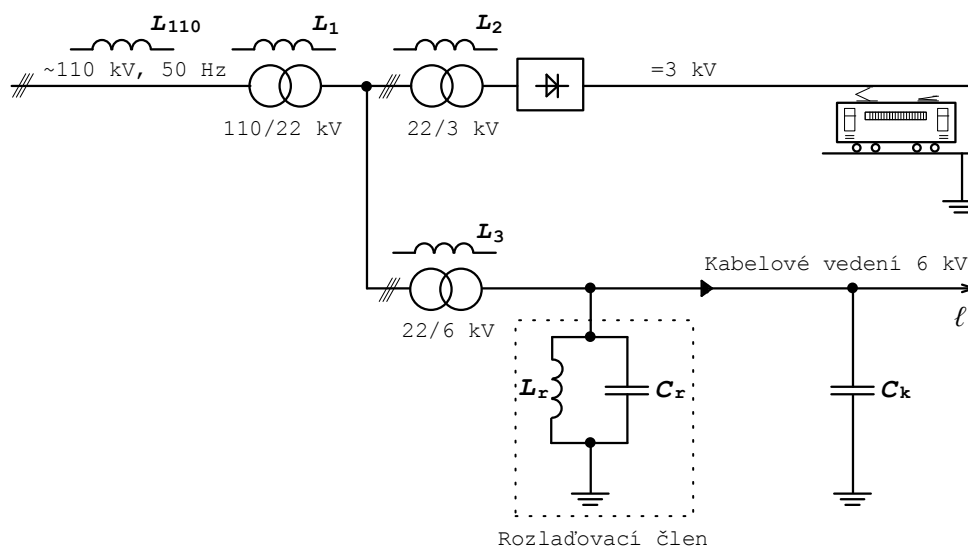
- Zvětšení úhlu překrytí sice zhoršuje účinek, ale zároveň omezuje poměrné hodnoty harmonických.
- Na velikost úhlu překrytí má vliv rozptylová reaktance transformátoru, která je známá, tudíž lze předem simulovat chování usměrňovače pro dané zatížení z hlediska nepříznivých vlivů na napájecí soustavu.
- Díky možnosti dopředu pevně stanovit největší velikost úhlu překrytí, a tudíž i účinek a poměrný obsah harmonických, je zřejmé, že trakční měnič bude splňovat požadavky dodavatele elektrické energie z hlediska EMC a nejsou nutná žádná další opatření například ve smyslu instalace FKZ.

V úvodu této kapitoly bylo konstatováno, že dvanáctipulzní zapojení trakčního usměrňovače produkuje harmonické řádů. Musí však platit, že rozptylové reaktance, tudíž procentní napětí nakrátko u_k obou sekcí sekundárních vinutí, jsou stejná a každá sekce přispívá polovinou z celkového zatěžovacího proudu. Pak se složky 5., 7., 17., 19. atd. harmonické, to jest řádů $6n \pm 1$, které se nekryjí s řády $12n \pm 1$, vyprodukované oběma sekcemi v celkovém proudu vzájemně vyruší. Jiná situace nastane v případě nesymetrie, tedy nestejných hodnot procentních napětí nakrátko obou sekcí. V takovém případě se ve spektru primárního proudu objeví i harmonické řádů 5, 7, 17, 19 atd. (25)

Nepříznivé vlivy na napájení kabelového rozvodu 6 kV*

Kabelové vedení 6 kV slouží pro napájení traťového zabezpečovacího zařízení. Původně bylo pro napájení vedení 6 kV použito napětí 3×400 V AC z přípojníc vlastní spotřeby trakční měnirny, které byly připojeny na transformátor vlastní spotřeby 22/0,4 kV. Jeho sekundární napětí pak bylo zvýšeno samostatným transformátorem 0,4/6 kV a připojeno na kabelové vedení, které napájelo jednotlivé kiosky.

V rámci rekonstrukcí měníren na koridorových tratích došlo ke změně výše uvedené konfigurace a to tak, že pro získání napětí 6 kV byl použit samostatný transformátor 22/6 kV připojený na společné sběrnice 22 kV, ze kterých je rovněž napájen trakční usměrňovač. Příslušné schéma je na obr. 2.28. Napájecí soustava, transformátory 110/22 kV, 22/6 kV a 22/3 kV představují podélné indukčnosti L_{110} a L_1 až L_3 , a vlastní kabelové vedení 6 kV o délce ℓ vykazuje příčnou kapacitu C_k . Podélnou indukčnost 6kV kabelu a impedanci napájeného kiosku lze pro jejich nepatrný vliv zanedbat.



Obr. 2.28 - Schéma napájení kabelu 6 kV z přípojníc 22 kV trakční měnirny

* Tato problematika souvisí s důsledky deformace proudu způsobené trakčním usměrňovačem, je proto účelné se o ní zmínit.

Proudové harmonické řádů $12n \pm 1$, generované trakčním usměrňovačem, vytvářejí na indukčnostech L_1 a L_{110} harmonické napětí, které pak napájí společné přípojnice 22 kV. Toto zkreslené napětí je přivedeno na sériovou kombinaci indukčnosti L_3 a kapacity C_k . Indukčnost L_3 je dána vlastnostmi transformátoru 22/6 kV a je konstantní, zatímco kapacita C_k je závislá na délce kabelu 6 kV. Z pohledu harmonických složek tvoří indukčnost L_3 a kapacita C_k sériový LC obvod, který má svoji rezonanční frekvenci. V praxi bylo zjištěno, že tato frekvence se při určitých délkách kabelového vedení může pohybovat v blízkém okolí frekvencí harmonických produkovaných usměrňovačem. Jedná se zejména o složky 11., 13., případně 23. a 25. harmonické. Pak by nastala podobná situace jako v případě analyzovaném v kapitole 2.3.5 v odstavci „*Ladění rezonančních větví FKZ*“, ze kterého vyplývá, že v případě naladění LC obvodu na frekvenci přivedenou na jeho svorky stoupne napětí na kondenzátoru teoreticky neomezeně nad hodnotu frekvenční složky přivedeného napětí. Jelikož napětí na kondenzátoru se v tomto případě rovná napětí na kabelu, napětí kritické harmonické se nasuperponuje na napětí základní harmonické a tímto zkresleným napětím je pak napájeno zabezpečovací zařízení. Je-li toto zařízení citlivé na deformaci napájecího napětí, může dojít k nesprávné funkci zabezpečovacího zařízení.

Této situaci je nutné z pochopitelných důvodů zabránit, proto se paralelně k přípojnicím 6 kV trvale připojuje rozladovací člen tvořený paralelní kombinací kondenzátoru C_r a indukčnosti L_r (obr. 2.28). Kapacita rozladovacího kondenzátoru se stanoví tak, aby s kapacitou nejkratší možné délky 6kV kabelu C_k a indukčností transformátoru L_3 vytvářela sériový rezonanční obvod, jehož rezonanční frekvence bude ležet spolehlivě pod hodnotou 550 Hz, tj. pod 11. harmonickou, tedy první možnou produkovanou trakčním usměrňovačem. Při jakékoliv větší délce 6kV kabelu pak rezonanční frekvence tohoto obvodu dále poklesne.

V provozu mohou nastat období, kdy trakční zatížení je minimální. V takovém případě by trakční měnič jako celek mohla vykazovat díky rozladovacímu kondenzátoru kapacitní účinník, proto se ke kondenzátoru trvale připojuje indukčnost L_r , jejíž jalový induktivní výkon pro základní harmonickou musí být roven jalovému kapacitnímu výkonu rozladovacího kondenzátoru, případně může být vyšší o hodnotu kapacity nejkratší provozně použitelné délky 6kV kabelu. Pro 11. harmonickou indukčnost L_r nenaruší funkci rozladovacího kondenzátoru (podíl impedancí obou prvků je $11^2 = 121$). (4)

3 Měření ve vybrané transformovně

Měření proběhlo v TNS Blansko od 20.01.2010 (od 10 hodin) do 21.01.2010 (do 11 hodin), tedy po dobu 25 hodin. Přehledové schéma TNS Blansko je na obr. 3.1 na straně 71.

3.1 TNS Blansko

TNS Blansko leží na dvoukolejné trati Brno – Česká Třebová. Do roku 1999, kdy byl zahájen elektrický provoz na této trati (elektrifikace byla zahájena v dubnu 1996), to byl jediný úsek I. železničního koridoru, který nebyl elektrizován. Úsek je spojnicí mezi elektrizovanými tratěmi s rozdílnými trakčními soustavami. Jižní část vychází ze střídavé jednofázové trakční proudové soustavy 25 kV, 50 Hz, severní část ústí do stejnosměrné trakční proudové soustavy 3 kV. Dělicí místo je před vjezdem do železniční stanice Svitavy od Brna tak, že železniční stanice Svitavy je již součástí stejnosměrné proudové soustavy.

V TNS Blansko jsou instalovány dva trakční transformátory. Oba mohou pracovat ve schématu napájení „V“, pak jeden transformátor napájí trakční vedení dvoukolejné tratě směrem na Svitavy, druhý směrem na Brno, nebo ve schématu „T“, kdy jeden transformátor napájí oba směry, a druhý slouží jako 100 % záloha (schéma obou zapojení viz kapitola 1.3). Ve směru na Svitavy se nejbližší trakční transformovna – přibližně po 50 km – nachází ve Svitavách (jeden transformátor), zhruba uprostřed této vzdálenosti je trakční spínací stanice Letovice. Ve směru na Brno je vzdálenost další TNS kratší (větší hustota provozu) a spínací stanice se nachází v Brně-Maloměřicích.

Všechny TNS a spínací stanice na trati Brno – Svitavy mohou být řízeny ústředně z elektrodispečinku ČD* Brno nebo obsluhou z místa. Tento systém řízení je chápán jako decentralizovaný řídicí systém. Systém přebírá kontrolu nad technologickým zařízením, v případě přítomnosti obsluhy na TNS zajišťuje informovanost obsluhy prostřednictvím volitelných monitorových snímků a umožňuje ovládání zařízení prostřednictvím PC. Ve všech režimech se uskutečňuje kontrola oprávněnosti a proveditelnosti jednotlivých manipulací. Místní ovládání je umožněno přímo ovládacími prvky na dveřích ovládacích skříní. Signalizace je provedena signálkami a ukazateli stavu. Funkčnost tohoto ovládání je podmíněna přepnutím přepínače na skříní do režimu „místně“. Je-li tento přepínač v poloze „dálkově“, je technologie ovládána z dozorny nebo ústředně z dispečinku. Povolení (předvolba) ústředního řízení se provádí přes klávesnici PC v dozorně TNS. Signalizace stavu jednotlivých prvků je na dozorně provedena pomocí volitelných obrazů na obrazovce PC. Decentralizovaný řídicí systém umožňuje nejen okamžitý přehled o aktuální situaci na TNS a přehled o poruchách, ale umožňuje rovněž zkoumat historii stavů a spínacích pochodů.

3.1.1 Popis stanoviště TNS

TNS Blansko je připojena ke dvěma přívodním linkám 110 kV, které jsou ve správě ČD. Dodavatelem elektrické energie je společnost E.ON Distribuce, a. s.

* Řídí všechny technologie TNS kromě zapouzdřených rozvodů 110 kV.

Přechod z venkovního vedení do rozvodny 110 kV je řešen pomocí průchodek SF₆ (hexafluorid sírový) – vzduch. V bezprostřední blízkosti vstupních průchodek 110 kV, vně objektu, jsou umístěny svodiče přepětí. Následuje zapouzďená rozvodna 110 kV s dvouřadým uspořádáním s jedním systémem podélně dělených přípojníc („H“). Rozvodna 110 kV je umístěna v 1. patře budovy.

Stanoviště olejových transformátorů 110/27 kV (jmenovité vnitřní napětí rozvodny je 27 kV) jsou řešena jako dvě kryté, vzájemně oddělené transformátorové komory. Transformátory jsou na straně 110 kV připojeny pomocí zapouzďených vodičů průchodkami v provedení olej – SF₆.

Rozvodna 27 kV se nachází v přízemí budovy a je realizována jako jednořadová kobková. Obsahuje 11 polí a je nevykonově dělená na tři části. První část obsahuje přívodní pole, dva vývody napájející trakční vedení směrem na Brno a jedno pole s vývodem na FKZ. Ze střední přípojnice je připojen jednofázový transformátor vlastní spotřeby 27/0,23 kV. Třetí část obsahuje tytéž elementy jako část první, napáječové vývody napájejí trakční vedení směrem na Svitavy. V přední části kobek je instalován vakuový jednopólový vypínač, jeden nebo dva odpojovače (dva v kobkách napáječových vývodů), přístrojový transformátor proudu, přístrojové transformátory napětí chráněné vn pojistkami a ovládací skříň. Pohony všech spínacích přístrojů vn jsou elektromotorické.

FKZ je umístěné vně budovy rozvodny 27 kV po jejích obou stranách v ohradě pod přístřeškem. Přechod napájecích pásových vodičů přes zeď rozvodny je realizován přes porcelánové průchodky.

3.1.2 Popis zařízení TNS

Rozvodna 110 kV

Řešení rozvodny 110 kV bylo v době realizace projektu zcela nové a unikátní, a to nejen v podmínkách ČD. Z ekologických a rozměrových důvodů byl použit zapouzďený rozvaděč se jmenovitým napětím 123 kV s vnitřní izolací plynem SF₆ firmy ABB typu ELK-0. Zapouzďený rozvaděč obsahuje výkonové vypínače (zhášecí medium rovněž SF₆), odpojovače se zemniči, měřicí transformátory napětí a měřicí transformátory proudu. Vývod na transformátory je proveden jako třífázový, ale u transformátorů zůstává jedna fáze nezapojena. Izolované zapouzďené rozvodny (GIS) mají ve srovnání s venkovními rozvodnami mnohem menší požadavky na zastavěný prostor. Provozní bezpečnost zapouzďených rozveden izolovaných plynem SF₆ nepodléhá vnějším vlivům jako je znečištění, vlhkost atd. Rozvodny proto mají nepatrné nároky na údržbu a při normálních pracovních a provozních podmínkách je lze pokládat za prakticky bezúdržbové.

Trakční transformátory a jejich stanoviště

Jednofázové regulační olejové trakční transformátory typu EJRH 28M-O od výrobce Škoda ETD Plzeň mají tyto parametry:

Jmenovitý výkon (bez ofukování/s ofukováním):	10/12,5 MV·A
Jmenovité napětí (primární/sekundární):	110 kV ± 8 × 2 %/27 kV
Jmenovitý proud (primární/sekundární):	113,6/463 A
Procentní napětí nakrátko u_k :	12,14 %

Nádoba transformátoru je zvonové konstrukce. Magnetický obvod je dvoujádrového provedení, vinutí je hliníkové z plochých izolovaných vodičů. Chlazení je řešeno samostatnou radiátorovou baterií do výkonu 10 MV·A jako přirozené, nad 10 MV·A s ofukováním radiátorů ventilátory. Řízení ofukování je automatické v závislosti na teplotě oleje transformátoru. Odbočky jsou řešeny na vinutí 110 kV s přepínačem pod zatížením. Řízení regulace je umožněno ústředně z elektrodispečinku ČD, dálkově z dozorny, místně tlačítky ze skříně motorového pohonu a nouzově ručně klikou u motorového pohonu. Transformátor je vybaven dvěma dilatačními nádobami – pro dilataci oleje v transformátoru (je umístěna na chladicí baterii) a pro dilataci oleje v nádobě přepínacího zařízení (umístěna na nádobě transformátoru). Transformátor je navržen tak, že mezi revizemi snese 200 zkratů proti zemi ve vzdálenosti 1 km od napájecí stanice. Na sekundární straně transformátoru je umístěna bleskojistka s počítadlem zásahů.

V každé komoře je zachytná havarijní jímka na 100 % objemu oleje transformátoru. Z důvodu použití nádobových (kostrových) ochranných je provedeno odizolování transformátorů od země.

Rozvodna 27 kV

Základním výkonovým prvkem rozvodny 27 kV je jednopólový vakuový vypínač firmy Siemens. Je určen pro jmenovité napětí 27,5 kV, jmenovitý proud 1600 A a jmenovitý vypínací proud 25 kA. Vypínač je vybaven motorovým střadačovým pohonem.

Obě přívodní pole od transformátorů jsou vybavena zpětnými wattovými relé typu GSCT 12 X2 z důvodu zamezení toku proudů z trakční do distribuční sítě. Tato relé, byť neslouží původnímu účelu, v současné době navíc znemožňují rekuperaci elektrické energie trakčních vozidel schopných rekuperovat. Dle sdělení obsluhy TNS byla tato relé v době měření vyblokována (do konce února 2010) a to z důvodu probíhajícího zkušební období možnosti rekuperace trakčních vozidel do sítě 110 kV*.

Filtračně-kompenzační zařízení (FKZ)

Venkovní stanoviště FKZ obsahuje indukčnosti a kapacity pro filtry 3. a 5. proudové harmonické (stanoviště je rozměrově připraveno i pro montáž filtru 7. harmonické), dekompenzační tlumivku a transformátor 27/5 kV pro dekompenzační větev. Kondenzátorové baterie filtrů jsou vybaveny napěťovou balanční ochranou, jejímž účelem je vyhodnocovat napěťové rozdíly v jednotlivých větvích baterie. Toto měřené napětí je v ideálním případě nepatrné, ale vlivem rozdílností jednotlivých kondenzátorů i vlivem nerovnoměrného stárnutí dielektrika jednotlivých kondenzátorů, dochází časem ke vzniku přirozené napěťové nesymetrie, na kterou ochrana nesmí reagovat. Balanční ochrana reaguje až na velkou napěťovou nesymetrii, vzniklou zjevným poškozením dielektrika, a odpojí celou baterii, čímž zabrání nedovolenému napěťovému namáhání ostatních kondenzátorů.

Celkový instalovaný výkon FKZ je $2 \times 3 \text{ MV} \cdot \text{Ar}$. Výkony dekompenzačních tlumivek regulují na napěťové hladině 5 kV měničové skříně typu COMPACT (v současné době se již vyrábějí regulátory

* Možnost zkušebně rekuperovat mají na této trati povoleno pouze lokomotivy řady ES 64 U4 („Taurus“).

pro napěťovou hladinu 27 kV – odpadá tedy transformace 27/5 kV). Skříně jsou umístěny v místnosti sousedící s rozvodnou 27 kV. Ztrátový výkon na tyristorech může dosáhnout dle sdělení obsluhy až 65 kW u každé skříně, proto je nutné jejich intenzivní chlazení. Systém chlazení byl upraven na základě zlepšovacího návrhu obsluhy TNS do následující podoby: ventilátor umístěný v místě horního krytu skříně nasává přes filtry vzduch do spodní části skříně, tento postupem nahoru ochlazuje tyristory a následně je odváděn potrubím vzduchotechniky buď do venkovního prostoru (v letních měsících), nebo po přemístění klapky v potrubí vzduchotechniky do vnitřního prostoru rozvodny 27 kV, kde přispívá v zimním období k jejímu vytápění.

Regulátory jsou nastaveny na hodnotu účinníku $\cos \varphi = 0,98$ induktivních a to i mimo jiné z důvodu předpokládaného vzniku jisté rezervy kapacitní složky proudu na přívodním vedení 110 kV (je ve správě ČD), neboť elektroměry* dodavatele elektrické energie jsou před vývodem tohoto vedení, a proto je třeba počítat v konečném důsledku i s jeho kapacitou. (5)

3.2 Schéma TNS a místo připojení měřicí aparatury

Měřicí aparatura byla zapojena podle schématu na obr. 3.1 na straně 71. V době měření bylo používané schéma napájení trakčního vedení do „T“, tedy v provozu byl pouze jeden trakční transformátor, který napájel oba směry traťových úseků (směr Brno i Svitavy) a podélné odpojovače v rozvodně 27 kV (ve schématu na obr. 3.1 označené jako „A“ a „B“) byly v sepnutém stavu. Díky tomu veškerý výkon TNS pak procházel místem připojení měřicí aparatury a výsledky měření pak dávaly přesnější obraz o výkonových poměrech v TNS a o kvalitativních parametrech odebírané elektrické energie.

K připojení měřicí aparatury byly na obou stranách využity měřicí převodníky instalované v rozvodnách. Napětí byla odebírána přímo ze svorek obvodů měřicích transformátorů napětí a hodnoty proudů byly odečítány pomocí klešťových proudových čidel zapojených do obvodů měřicích transformátorů proudu.

Na straně 110 kV byl k měření použit kalibrovaný analyzátor sítě BK500-ENA330, který snímal hodnoty napětí a proudu s frekvencí 9 600 vzorků za sekundu. K měření na straně 27 kV byla použita nekalibrovaná měřicí aparatura sestávající z napěťových převodníků LEM, z měřicího převodníku USB 6210 a z notebooku pracující se vzorkovací frekvencí 10 000 vzorků za sekundu. Nasnímané hodnoty byly následně zprůměrovány do 5 sekundových intervalů. Tyto hodnoty jsou v následujícím vyhodnocení měření chápány jako okamžité. Nejistota měření celé sestavy byla vyčíslena na 1,5 % pro měření napětí a 3,7 % pro měření proudu.

* Dodavatelem elektrické energie jsou v současnosti běžně instalovány nové měřicí soupravy pro měření spotřeby elektřiny (elektroměry). Dosavadními elektroměry byla měřena činná energie, jalová indukční energie a čtvrt hodinové maximum (kW). Klasický jalový elektroměr v případě kapacitního účinníku „stojí na brzďě“, a tedy nic nezaznamenává. Nové měřicí soupravy, tzv. „čtyřkvadrantové“, jsou vedle měření čtvrt hodinového maxima schopny měřit odběr a dodávku činné energie a současně měřit jalovou induktivní i kapacitní energii. Vyhodnocení měření samostatně obsahuje hodnoty účinníku a hodnoty nevyžádané dodávky kapacitní jalové energie.

4 Zpracování měření

Na straně 110 kV byly vyhodnocovány tyto veličiny:

- efektivní hodnoty sdružených napětí (3 fáze);
- harmonické složky napětí od 1. do 40. řádu (3 fáze);
- efektivní hodnota proudu;
- harmonické složky proudu od 1. do 40. řádu;
- činný výkon;
- účinník základní harmonické napětí a proudu $\cos \varphi$;
- skutečný (opravdový) účinník λ (viz definice a vztah (2.61) v kapitole 2.3.3 na straně 50);
- součinitel napět'ové nesymetrie ρ_u (viz kapitoly 2.2.1 a 2.2.2);
- činitel harmonického zkreslení napětí THD_U (3 fáze), (viz vztah (2.62) na straně 50);
- činitel harmonického zkreslení proudu THD_I (viz vztah (2.62) na straně 50).

Na straně 27 kV byly vyhodnocovány tyto veličiny:

- efektivní hodnota napětí;
- harmonické složky napětí od 1. do 40. řádu;
- efektivní hodnota proudu;
- harmonické složky proudu od 1. do 40. řádu;
- činný výkon;
- fázový posuv o úhel φ (ve stupních) mezi napětím a proudem;
- činitel harmonického zkreslení napětí THD_U ;
- činitel harmonického zkreslení proudu THD_I .

Naměřená data byla dále zpracována v programu Microsoft Office Excel 2003.

Vyhodnocení měření se opírá o platný dokument *Pravidla provozování distribučních soustav – PPDS* (26). Dokument byl zpracován provozovateli distribučních soustav* v prosinci 2008 a následně schválen Energetickým regulačním úřadem dne 17.03.2009.

PPDS představují komplexní materiál poskytující souhrnně všechny potřebné informace bez nutnosti pracovat s mnoha souvisejícími právními, technickými a dalšími podklady. Zpracovávají platné zákony, vyhlášky a normy týkající se podmínek připojení a dodávek elektřiny pro konečné zákazníky.

Vyhodnocení napět'ové nesymetrie a harmonických napětí na napět'ové hladině 110 kV vychází z dokumentu (10) – *PPDS – Příloha 3 – Kvalita elektřiny v distribuční soustavě, způsoby jejího zjišťování a hodnocení*. Část 4.2 zmíněného dokumentu pojednává o charakteristikách elektřiny na hladině napětí 110 kV a předávacích místech PS/DS. Z hlediska vyhodnocení zpětných vlivů elektrické trakce na napájecí soustavu 110 kV jsou důležité tyto podmínky:

1. *Velikost a odchylky napájecího napětí*. Za normálních provozních podmínek musí být během každého týdne 95 % průměrných efektivních hodnot napájecího napětí v měřicích intervalech 10

* ČEZ Distribuce, a. s.; E.ON Distribuce, a. s.; PREdistribuce, a. s.

minut v rozsahu $110 \text{ kV} \pm 10 \%$. Napětí se tedy musí pohybovat v rozsahu od 99 kV do 121 kV. Měří se hodnota sdruženého napětí ve tří fázích.

2. *Nesymetrie napětí.* Za normálních provozních podmínek musí být během každého týdne 95 % středních efektivních hodnot zpětné složky napájecího napětí v měřicích intervalech 10 minut menší než 1,5 % sousledné složky, tzn. $\rho_u \leq 1,5 \%$.

3. *Harmonická napětí.* Za normálních provozních podmínek musí být během každého týdne 95 % průměrných efektivních hodnot harmonických napětí U_h menších nebo maximálně rovno 2 % U_n a celkové harmonické zkreslení THD menší nebo maximálně rovno 2,5 %. Vše opět v měřicích intervalech 10 minut. První podmínka v praxi představuje vztah:

$$\frac{U_h}{U_n} \cdot 100 \leq 2 \quad (\%)$$

kde:

U_h je efektivní hodnota napětí příslušné harmonické (V);

U_n je efektivní hodnota jmenovitého napětí sítě (V), tj. 110 000 V.

Ve druhém případě se celkové harmonické zkreslení počítá zvlášť pro každou fázi podle vztahu:

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}}{U_1} \cdot 100 \leq 2,5 \quad (\%)$$

kde:

U_h je efektivní hodnota napětí příslušné harmonické (V);

U_1 je efektivní hodnota napětí základní harmonické (V).

4. *Účinník.* Energetický zákon (zákon č. 222/1994 Sb.) přikazuje odběrateli odebírat elektrickou energii s hodnotou induktivního účinníku 0,95 až 1. Případná podkročení nebo přesahy do kapacitní oblasti jsou ze strany dodavatele elektrické energie penalizovány. Instalované elektroměry zaznamenávají činný a jalový výkon ve čtvrthodinách, hodnota účinníku se stanoví z měsíčních naměřených hodnot induktivní jalové energie Q a činné energie P . Z těchto hodnot se vypočte tangenta úhlu φ (Q/P) a následně $\cos \varphi$.

Obdobné podmínky pro proudové a k nim vztažené hodnoty se běžně nestanovují. Měření proudů v odběrných místech sítě 110 kV je doporučeno v případech, kdy odběratel může charakterem svého odběru významně ovlivňovat kvalitu napětí. V případě tohoto měření je však možné chápat jako od proudů odvozené veličiny účinník $\cos \varphi$ a opravdový účinník λ , a podle *PPDS – Přílohy 3* vyhodnotit tyto veličiny rovněž v měřicích intervalech 10 minut.

PPDS – Příloha 3 předpokládá měřicí interval 10 minut v pevných krocích. To znamená, že každý interval začíná na 10 minutové hranici reálného času a jednotlivé intervaly navazují na sebe

a nepřekrývají se. Při frekvenci ukládání průměrných hodnot napětí a proudu každých 5 sekund připadá na cyklus 10 minut 120 hodnot. Celkem bylo uloženo za 25 hodin měření pro každou veličinu 18 000 hodnot. Z takto velkého množství údajů je sice možné sestavit časový průběh veličin za celou dobu měření, ale graf je, zejména v případě dynamicky měnících se hodnot (výkon, proud), značně nepřehledný. Proto byla zvolena varianta tzv. klouzavých 10 minutových průměrů, představující určitý kompromis mezi přímým vynesemím hodnot do časové osy a pevným průměrem, která je oproti pevným 10 minutovým průměrům přesnější (i přesnější) a po každých 120 vzorcích obsahuje i tyto pevné průměry, a tak vyhovuje podmínkám *PPDS*. Navíc dovoluje vykreslit věrohodnější časový průběh. Na druhou stranu je časový průběh klouzavých 10 minutových průměrů oproti přímému vynesení hodnot hladší a je zbaven špičkových hodnot, které je nutné vyhledat v tabulce.

Klouzavý průměr předpovídá budoucí hodnoty proměnné na základě průměrné hodnoty proměnné z jejich předchozích 120 hodnot. Počínaje 120. řádkem je tedy pro každou další hodnotu klouzavého průměru k dispozici vždy 120 předchozích hodnot. Prvních 119 hodnot klouzavého průměru je vypočítáno podle stejné logiky s tím rozdílem, že je průměrován pouze dostupný počet hodnot a to od 1 do 119. Obecně se každá hodnota klouzavého průměru (kromě prvních 119) počítá podle vztahu:

$$X_{10'} = \frac{\sum_{n=1}^{120} X_n}{120}$$

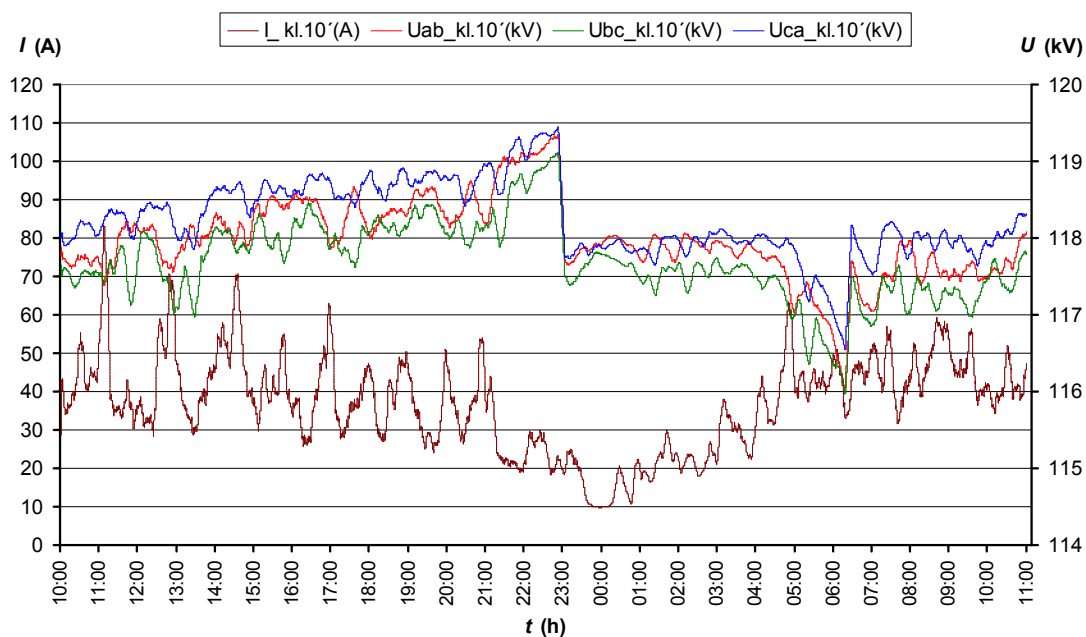
kde X je daná proměnná (napětí, činitel nesymetrie, činitel harmonického zkreslení, účinník atd.).

4.1 Vyhodnocení velikosti napájecího napětí a napět'ové nesymetrie

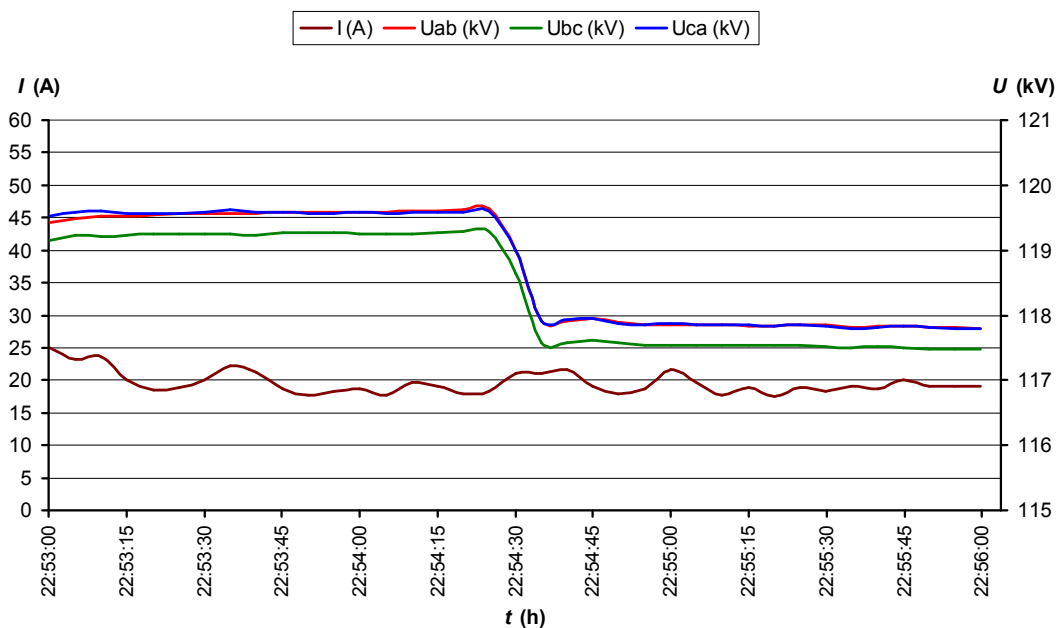
Obr. 4.1 zobrazuje klouzavé 10 minutové průměry efektivních hodnot sdružených napětí na přívodu TNS a klouzavé 10 minutové průměry efektivní hodnoty proudu v přívodním vedení představující celkový odběr TNS tj. včetně vlastní spotřeby TNS. Za zmínku stojí oblast strmého poklesu napětí všech tří fází v čase 22:54:25 hodin a jeho opětovného strmého nárůstu v čase 06:20:20 hodin. Po detailním přiblížení poklesu (viz obr. 4.2) lze z průběhu napětí a proudu učinit závěr, že odběr TNS byl v okamžiku poklesu konstantní, pohyboval se kolem hodnoty 20 A, a na pokles napětí neměl přímý vliv. Důvodem postupného nárůstu napětí v síti po 21. hodině je celkový postupný pokles odběrů v síti v globálnějším měřítku. Skoková změna napětí byla způsobena přepnutím odbočky transformátoru v nadřazené soustavě. Poté, zhruba až do 4 hodin ráno, se napětí, i přes narůstající trakční odběr, udržovalo na přibližně konstantní úrovni, načež začalo strměji klesat i přes v té době již přibližně ustálený trakční odběr. Důvodem byl začátek ranní špičky – opět v širším měřítku. Následovalo přepnutí odbočky transformátoru v nadřazené soustavě a skokový nárůst napětí.

Limity klouzavých 10 minutových průměrů napájecího napětí nebyly překročeny. Minimální hodnota činila 115,9 kV a maximální 119,4 kV.

Ani okamžité hodnoty napětí nepřekročily po dobu měření limity v žádném okamžiku, nejmenší naměřený 5 sekundový průměr napětí byl 115,4 kV a nejvyšší 119,6 kV. Nejmenší okamžitý proud byl 3,1 A a nejvyšší 158,9 A.



Obr. 4.1 - Časový průběh klouzavých 10 minutových průměrů napětí na přívodu linky 110 kV a proudu v přívodním vedení

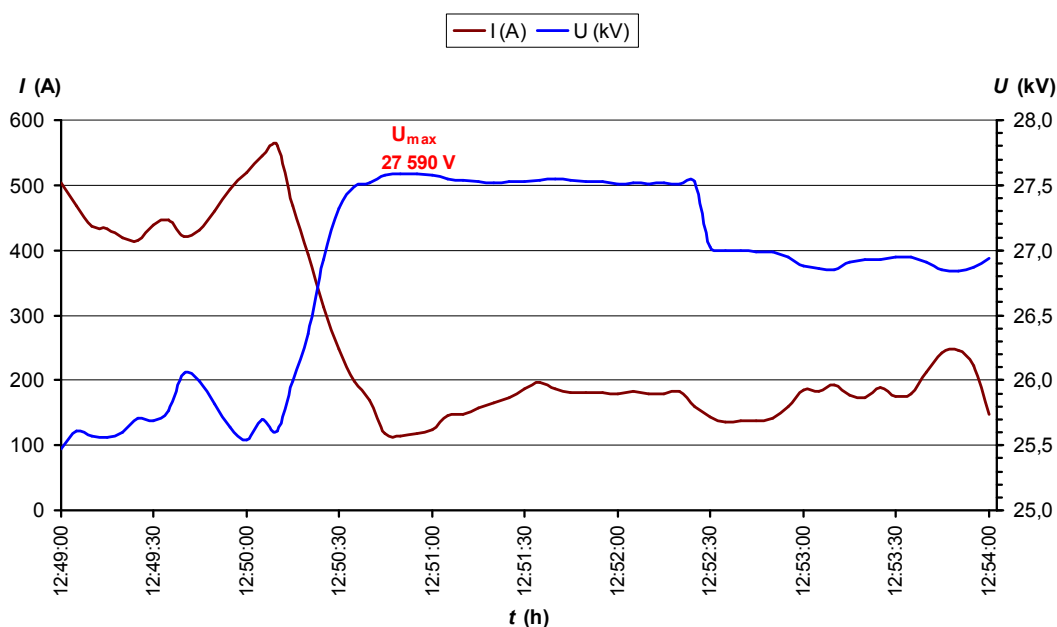


Obr. 4.2 - Časový průběh okamžitých hodnot napětí a proudu před a po snížení napětí v síti 110 kV

Napětí na sekundární straně transformátoru v místě připojení měřicí aparatury (viz schéma na obr. 3.1 na straně 71) lze chápat jako napětí v trakčním vedení v místě napájení z TNS. Podle ČSN EN 50163 (viz tab. 1 na straně 16) je maximální trvale přípustné napětí 27,5 kV, což bylo překročeno v době mezi 12:50:40 hodin a 12:52:25 hodin, tedy na dobu 1,75 minuty. Detailní časový průběh tohoto překročení je zachycen na obr. 4.3. Maximální naměřená okamžitá hodnota činila 27 590 V. Norma však připouští i krátkodobé zvýšení napětí nad 27,5 kV až na hodnotu 29 kV a to po dobu maximálně

5 minut, což nebylo překročeno. Z grafu je rovněž patrné, že k nárůstu napětí došlo po velkém snížení trakčního odběru v relativně krátkém čase. Konec období zvýšeného napětí je ukončen skokem na hodnotu 27 kV, což by odpovídalo rozdílu napětí o 2 % (0,54 kV) při přepnutí odbočky trakčního transformátoru. Minimální okamžitá hodnota napětí trakčního vedení byla 24,4 kV. Obecně je snahou udržovat napětí na výstupu z TNS v blízkosti maximální povolené hodnoty, aby na konci napájeného úseku nedošlo vlivem úbytku napětí v trolejovém vedení k podkročení jeho limitní hodnoty.

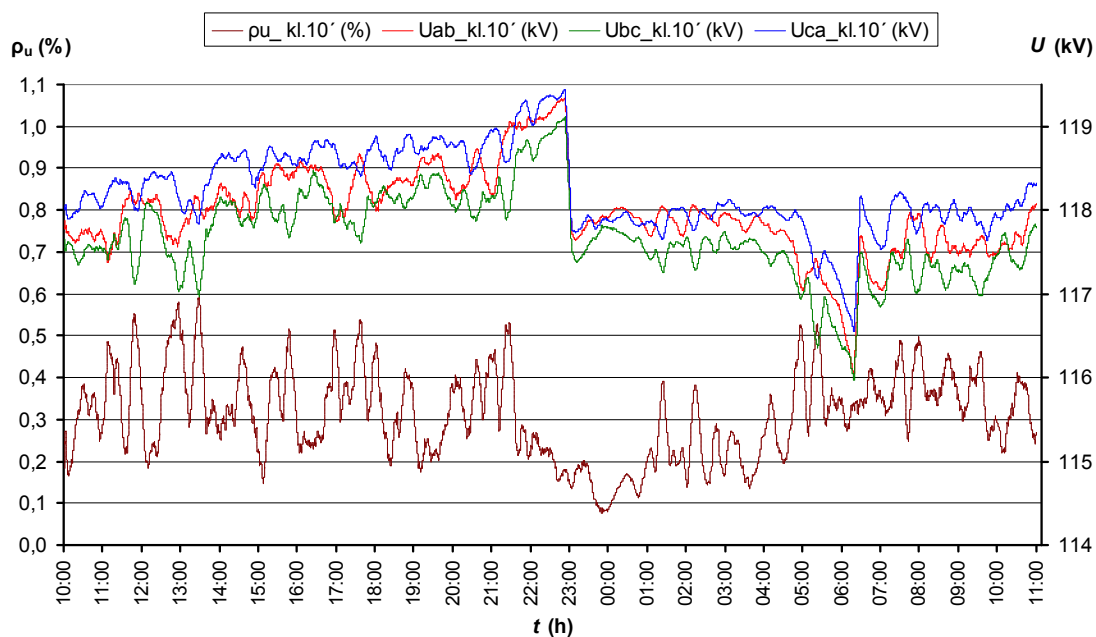
Celkový časový průběh okamžitých hodnot napětí a proudu na sekundární straně trakčního transformátoru je zobrazen v Příloze A. V Příloze B je zachycen časový průběh klouzavých 10 minutových průměrů napětí na primární a sekundární straně trakčního transformátoru.



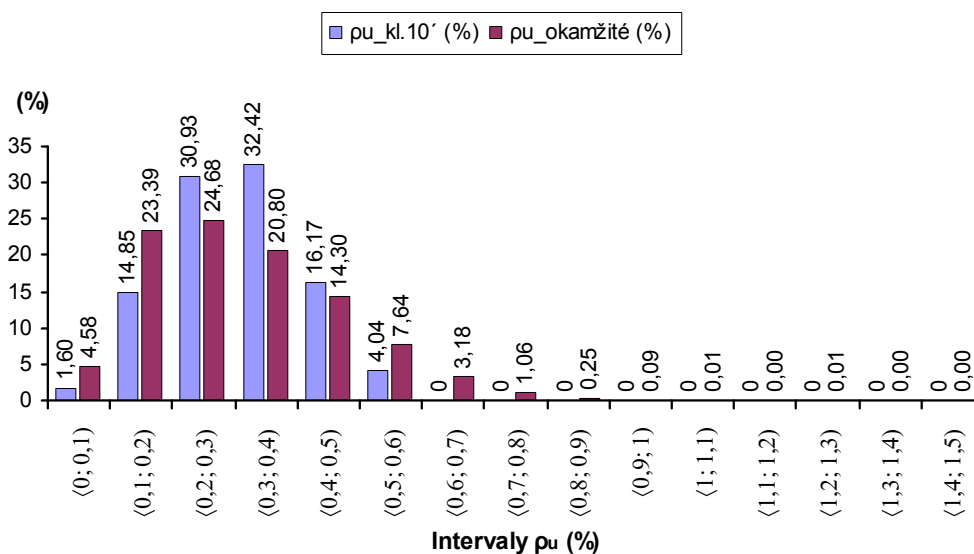
Obr. 4.3 - Časový průběh okamžitých hodnot napětí a proudu na sekundární straně trakčního transformátoru v době překročení maximálního trvale přípustného napětí trakčního vedení

Obr. 4.4 názorně dokládá vzájemný vztah rozdílů velikostí napětí v jednotlivých fázích a velikosti činitele napětěvé nesymetrie. Je dobře vidět, že v době nejvyšších rozdílů napětí v jednotlivých fázích (kolem 13. hodiny a kolem 13:30 hodin) je činitel nesymetrie nejvyšší. Naopak v době kolem půlnoci jsou hodnoty napětí téměř „u sebe“ a činitel napětěvé nesymetrie je nejnižší. Obr. 4.4 zobrazuje časový průběh klouzavých 10 minutových průměrů.

Maximální dosažená hodnota klouzavého 10 minutového průměru činitele napětěvé nesymetrie byla 0,594 % a minimální 0,077 %. Stanovený limit 1,5 % nebyl překročen. V okamžitých hodnotách bylo maxima 1,27 % dosaženo v okamžiku maximálního odběru TNS (158,9 A na hladině 110 kV) v 16:56:05 hodin a naopak minima 0,0097 % v 23:42:35 hodin. Podrobnější přehled o četnostech výskytů okamžitých hodnot i klouzavých 10 minutových průměrů činitele napětěvé nesymetrie v jednotlivých intervalech poskytuje histogram na obr. 4.5. Jedná se o procentuální zastoupení hodnot patřících do daného intervalu z celkového počtu hodnot.

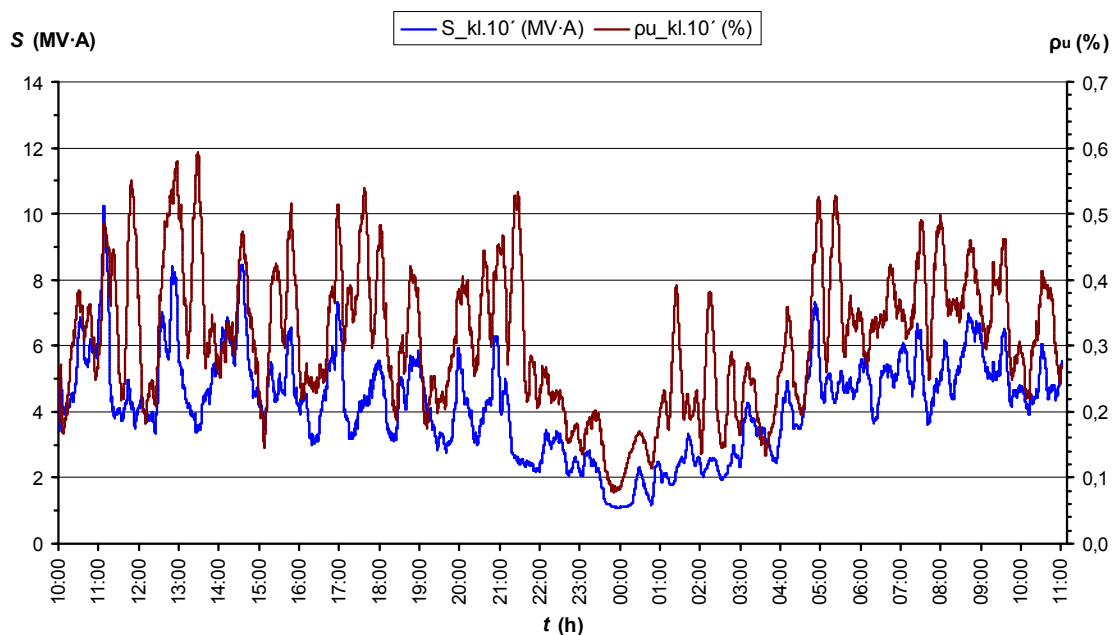


Obr. 4.4 - Časový průběh klouzavých 10 minutových průměrů napětí na přívodu linky 110 kV a klouzavých 10 minutových hodnot činitele napětové nesymetrie

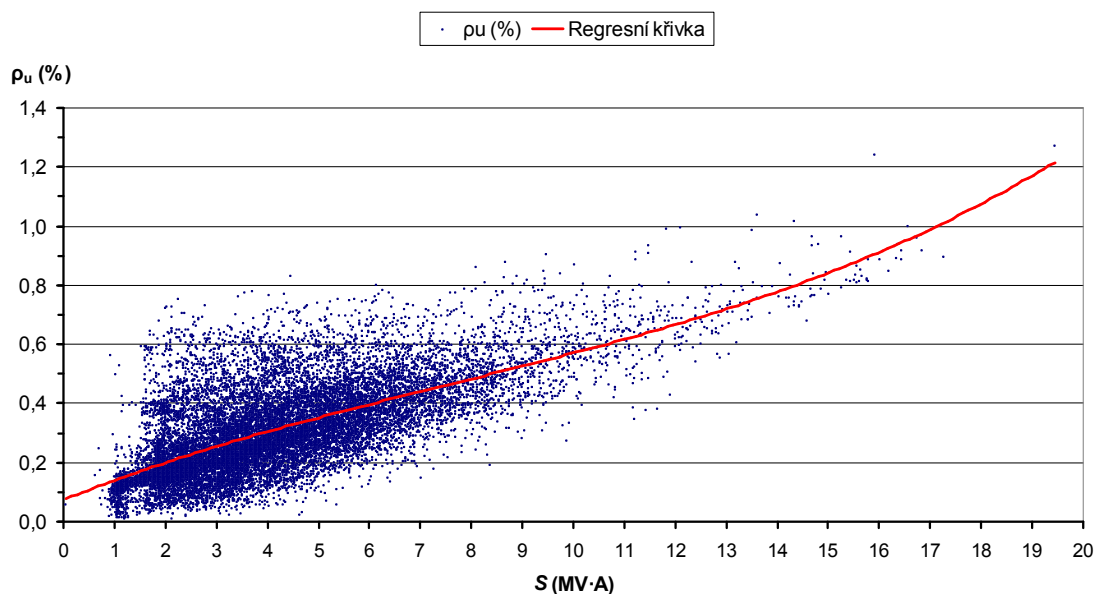


Obr. 4.5 - Histogram četností výskytů klouzavých 10 minutových průměrů a okamžitých hodnot činitele napětové nesymetrie

Na obr. 4.6 je zachycen časový průběh klouzavých 10 minutových průměrů zdánlivého výkonu a činitele napětové nesymetrie. Zdánlivý výkon S byl odvozen z naměřených hodnot činného výkonu P a skutečného účinníku λ na straně 110 kV pomocí vztahu $S = P/\lambda$. Závislost mezi velikostí odebíraného výkonu a činitelem napětové nesymetrie je patrná z obr. 4.7. Téměř přímková regresní křivka dokazuje přímou úměru mezi velikostí odebíraného výkonu a činitelem napětové nesymetrie, byť je rozptyl činitele pro stejné zatížení, zejména pro nižší odběry, až 0,8 %.



Obr. 4.6 - Časový průběh klouzavých 10 minutových průměrů odebíraného výkonu TNS a činitele napěťové nesymetrie

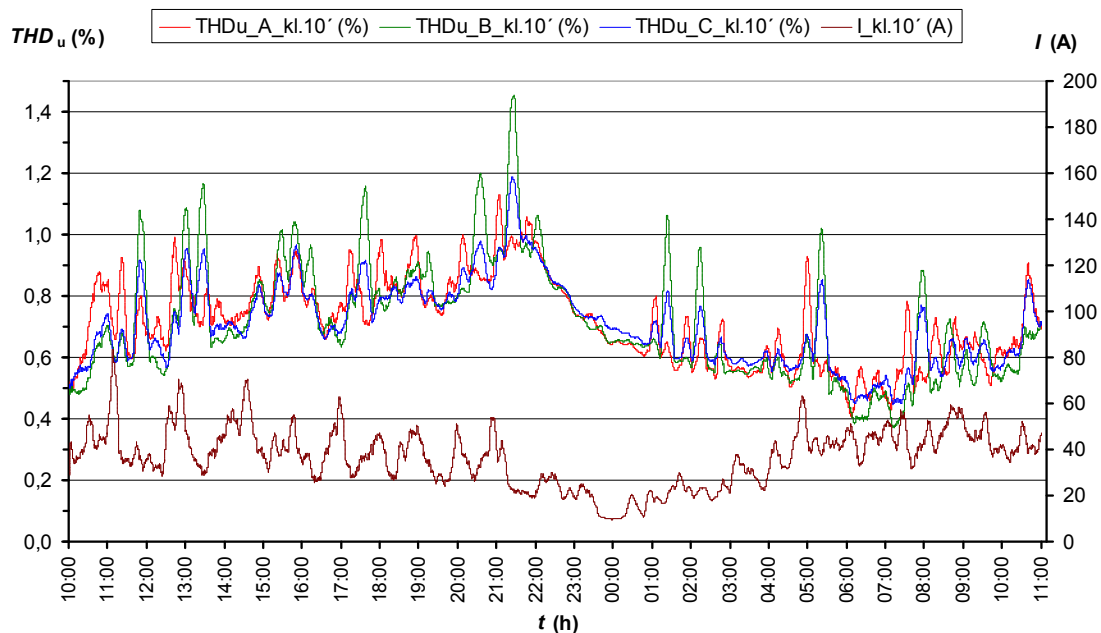


Obr. 4.7 - Závislost činitele napěťové nesymetrie na odebíraném výkonu (okamžité hodnoty)

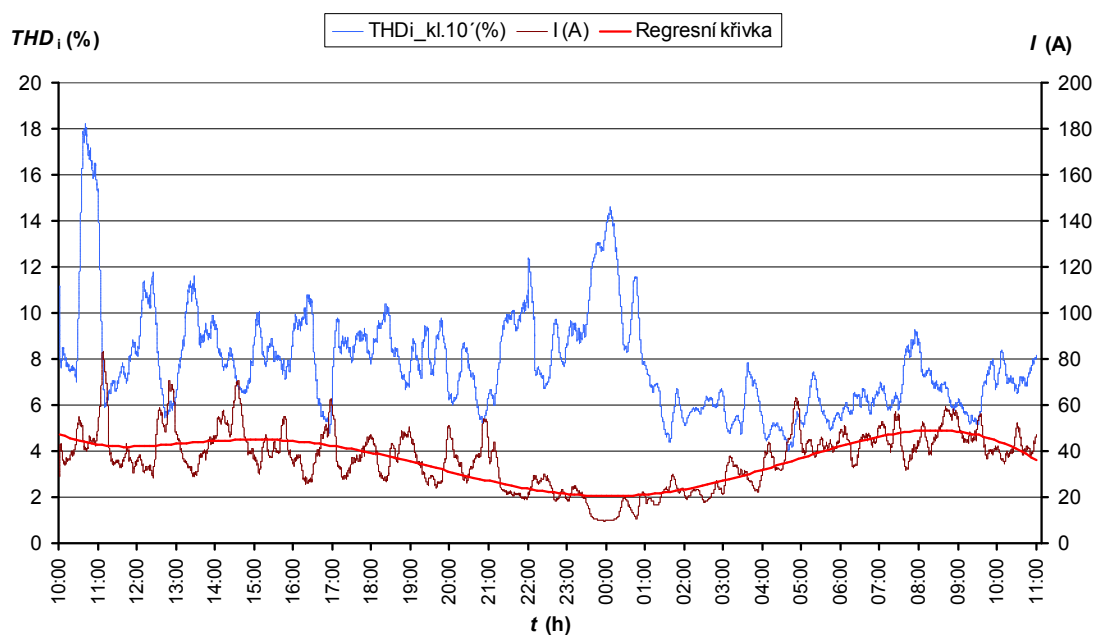
V Příloze C je zobrazen časový průběh okamžitých hodnot a klouzavých 10 minutových průměrů činného výkonu TNS naměřeného na primární straně trakčního transformátoru a činitele napěťové nesymetrie. Z průběhu je zřejmé, že zatížení transformátoru se několikrát pohybovalo nad jeho jmenovitým výkonem, maximální změřená okamžitá hodnota zdánlivého výkonu byla 19,4 MV·A. Takto krátkodobá přetížení však musí trakční transformátory snést. U trakčních transformátorů se předpokládá značně proměnlivý cyklus zatížení, a jak je zřejmé z průběhu zatížení, následoval po každé takové špičce pokles odběru na hodnoty hluboko pod jmenovitým výkonem transformátoru.

4.2 Vyhodnocení harmonických a účinníků

Na obr. 4.8 je zachycen časový průběh klouzavých 10 minutových průměrů celkového harmonického zkreslení napětí THD_U v každé fázi a klouzavých 10 minutových průměrů proudu v přívodním vedení.



Obr. 4.8 - Časový průběh klouzavých 10 minutových průměrů celkového harmonického zkreslení napětí a klouzavých 10 minutových průměrů proudu v přívodním vedení



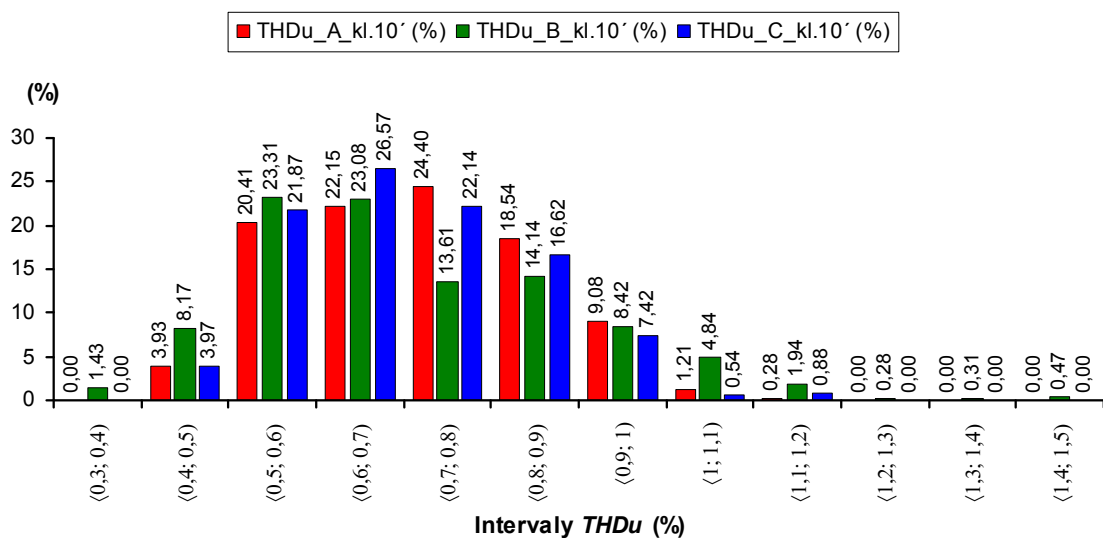
Obr. 4.9 - Časový průběh klouzavých 10 minutových průměrů celkového harmonického zkreslení proudu v přívodním vedení a klouzavých 10 minutových průměrů proudu v přívodním vedení

Obr. 4.9 zobrazuje časový průběh klouzavých 10 minutových průměrů proudu v přírodním vedení a jeho celkového harmonického zkreslení THD_I . Určit jednoznačnou vzájemnou závislost všech veličin není snadné. Pro dokreslení celé situace je v *Příloze D* zobrazen časový průběh klouzavých 10 minutových průměrů poměrných hodnot (poměr harmonické daného řádu k základní harmonické vyjádřený v procentech) harmonických proudů vybraných řádů a celkového harmonického zkreslení proudu na primární straně trakčního transformátoru. V *Příloze E* je totéž pro napětí v přírodním vedení 110 kV pro fázi „B“. Ostatní fáze vykazují podobné průběhy, ale fáze „B“ vykazuje vyšší špičkové hodnoty. Z obr. 4.8 je zřejmé, že THD_U v připojovacím bodě TNS se ne vždy odvíjí od velikosti celkového odběru TNS a jeho harmonického zkreslení. Při analýze je nutné vycházet z proudu naměřeného v přírodním vedení a jeho spektra harmonických, protože tento je „produktem“ TNS. O napětí to tvrdit nelze, neboť toto může být ovlivněno ostatními odběrateli již v místě připojení přírodní linky 110 kV k distribuční síti ve společném napájecím bodě. Názornou ukázkou této situace může být období mezi 20. až 22. hodinou, kdy docházelo k postupnému nárůstu THD_U ve všech fázích, přitom průměrná hodnota trakčního odběru se pohybovala na konstantní úrovni a THD_I mezi 20. a 21. hodinou mělo klesající tendenci. Příčinou by mohly být odběry domácností (televizních přijímačů), čemuž by odpovídal i průběh 5. harmonické napětí v síti (*Příloha E*).

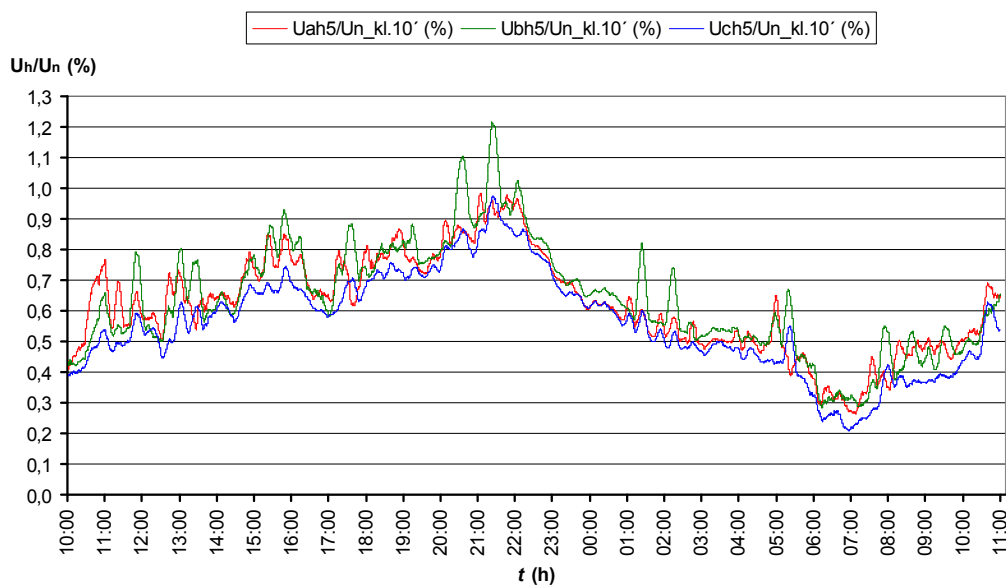
Spektrum harmonických proudů zvolených řádů 3, 4, 5 a 7, zobrazené v *Příloze D*, představuje výraznější hodnoty (ostatní jsou zanedbatelné co do jejich průběhů i velikostí). Ve spektru jednotlivých harmonických generovaných TNS se v době od začátku měření až do zhruba 20. hodiny vyskytuje dominantní 3. harmonická, poté dochází k jejímu poklesu, přibližně současně s poklesem odběru TNS, a znovu narůstá od 3. hodiny ranní. Skoro opak průběhu zaznamenává 5. harmonická, která kulminuje kolem půlnoci a následně klesá až do zhruba 4. hodiny ranní a poté až do konce měření nabývá zanedbatelných hodnot. Poměrně zanedbatelný je výskyt 4. harmonické, která v jistých nepravidelných intervalech „špičkuje“ z jinak poměrně malých hodnot. 7. harmonická se po celou dobu pohybuje kolem ustáleného průměru, nad který stoupne mezi 23. až 1. hodinou ranní. V tomto zmíněném časovém období dochází k nárůstu poměrných hodnot všech harmonických při současně nejnižším odběru TNS za celé měřené období. Celkový činný výkon TNS měřený na primární straně se v té době pohyboval kolem necelé 1 MW, přitom THD_I dosáhlo druhé, respektive první nejvyšší hodnoty (viz dále). Podobný trend – malý proud a jeho velké THD_I a obráceně lze vysledovat ve vícero případech.

O významu a účinnosti filtrů pro 3. a 5. harmonickou vypovídá časový průběh těchto harmonických proudů v období mezi 10:28 a 11:08 hodin, kdy bylo FKZ vypnuto (viz *Příloha D*). 3. harmonická, a v případě jejího útlumu i 5. harmonická, mají dominantní vliv na celkový průběh THD_I po celou dobu měření. Pro přesnou analýzu průběhů jednotlivých harmonických by bylo vhodné znát širší souvislosti, jako druhy projíždějících hnacích vozidel a další charakteristické vlastnosti všech spotřebičů napájených z TNS. Rovněž měření THD_U v přírodním vedení při odpojené TNS by přispělo k zpřesnění analýzy.

Z hlediska PPDS – *Přílohy 3* jsou limitní hodnotou pro 10 minutové průměry THD_U v napájecím vedení 2,5 %. PPDS ovšem neřeší původ tohoto zkreslení, pouze stanoví podmínku dodržování jeho mezí. Důležité však je, že, jak je mimo jiné patrné i z obr. 4.8 na straně 79, nedošlo k překročení uvedené limitní hodnoty. Maximální hodnota klouzavého 10 minutového průměru byla ve fázi „B“ a představovala 1,46 %. Pro doplnění je na obr. 4.10 zobrazen histogram četnosti výskytů THD_U ve všech fázích.



Obr. 4.10 - Histogram četností výskytů klouzavých 10 minutových průměrů činitelů celkových harmonických zkreslení THDu v jednotlivých fázích přírodního vedení 110 kV

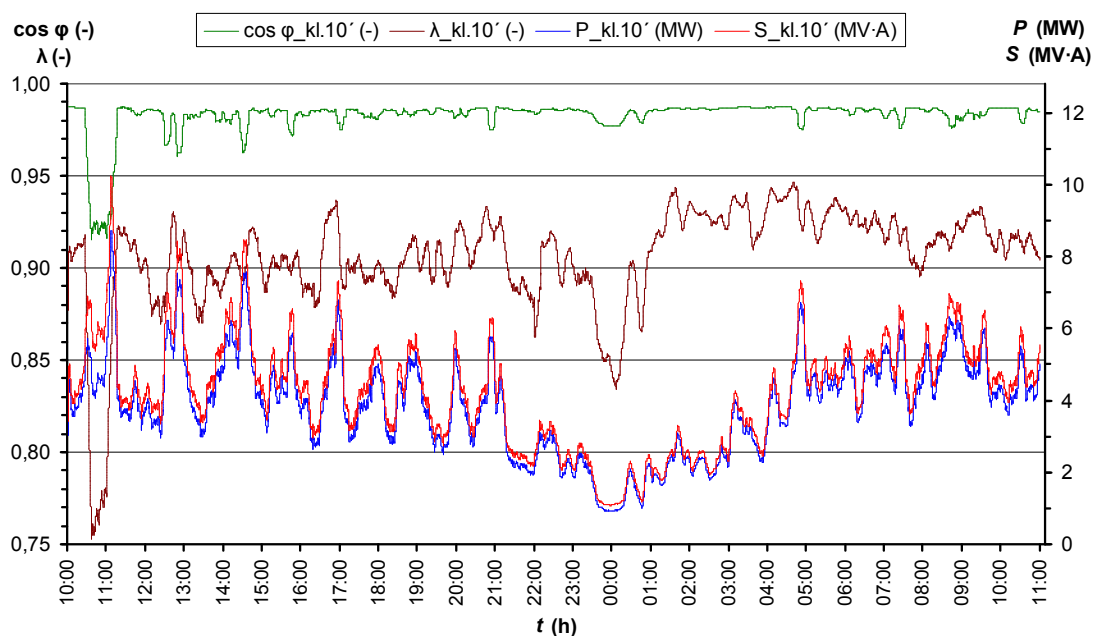


Obr. 4.11 - Časový průběh klouzavých 10 minutových průměrů poměrných hodnot napětí 5. harmonické všech tří fází vztahených ke jmenovité hodnotě napětí sítě 110 kV

PPDS také uvádí limitní hodnotu pro 10 minutové průměry poměrů efektivních hodnot jednotlivých harmonických napětí U_h a jmenovité efektivní hodnoty napětí napájecí sítě U_n , tedy ke 110 kV. Na rozdíl od sítě vn, kde tyto limitní hodnoty jsou podle ČSN EN 50160 specifikovány pro každou harmonickou zvlášť, je zde stanovena hranice 2 % bez ohledu na řád harmonické. V daném případě dosahovala nejvyšších poměrných hodnot U_h/U_n 5. harmonická, proto je na obr. 4.11 vynesena její

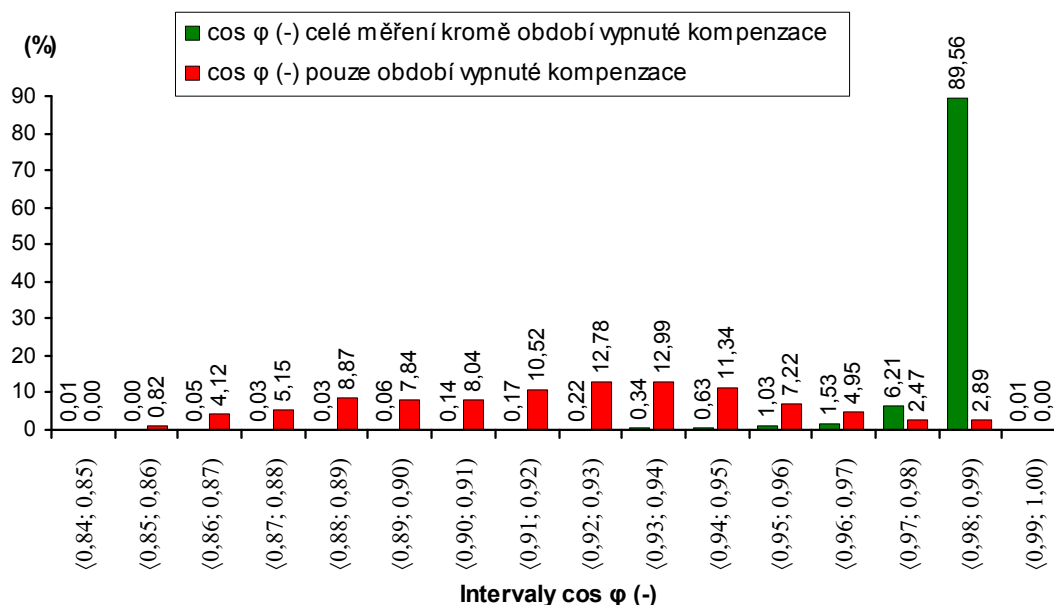
časový průběh pro všechny tři fáze. Rovněž zde nedošlo k překročení limitní hodnoty, neboť maximální 10 minutový průměr činil 1,22 % ve fázi „B“.

Na obr. 4.12 je zobrazen časový průběh klouzavých 10 minutových průměrů účinníku $\cos \varphi$, opravdového účinníku λ (PF) a dále činného a zdánlivého výkonu na straně 110 kV. Hodnota λ určuje poměr činného (P) a zdánlivého (S) výkonu a v podstatě udává, jaká část z celkového přenášeného výkonu připadá na činný výkon. Zbytek pak tvoří výkon jalový a deformační. Je zřejmé, že správnou kompenzací a filtrací lze zvýšit podíl činného výkonu. Důkazem je opět období mezi 10:28 až 11:08 hodinou, kdy FKZ bylo vypnuto. V té době na newattové výkony připadlo až 25 % z celkového přenášeného výkonu.



Obr. 4.12 - Časový průběh klouzavých 10 minutových průměrů účinníku $\cos \varphi$, opravdového účinníku λ a činného a zdánlivého výkonu na straně 110 kV

Histogram četností výskytů okamžitých hodnot účinníku je na obr. 4.13. Zobrazuje procentuální zastoupení hodnot patřících do daného intervalu v poměru k celkovému počtu hodnot. Vyhodnocení hodnot účinníku je rozděleno na dvě části a to na celé období měření, vyjma časového intervalu od 10:28 do 11:08 hodin (vypnuté FKZ), a na měření pouze v tomto intervalu. Toto rozdělení umožňuje získat představu o důležitosti kompenzace a o tom, s jak nízkým účinníkem odebírá výkon TNS bez kompenzace. Je zřejmé, že při vypnuté kompenzaci převládá většina okamžitých hodnot (82,47 %) nesplňuje předepsaný interval pro $\cos \varphi$, jenž činí 0,95 až 1 induktivních. Na druhé straně, při zapnuté kompenzaci, se do předepsaného intervalu nevejde 1,67 % hodnot. Nutno zdůraznit, že se jedná o zastoupení okamžitých hodnot, které se vyskytují pouze při velkých dynamických změnách trakčního proudu a to po přechodnou dobu. V konečném čtvrt hodinovém měřeném intervalu se pravděpodobně nijak neprojeví, ale vzhledem k tomu, že nejsou známy čtvrt hodinové hodnoty činného a jalového výkonu, které zaznamenávají elektroměry, a ze kterých se následně vypočítává měsíční hodnota $\cos \varphi$, tak nelze objektivně stanovit jednoznačný závěr.



Obr. 4.13 - Histogram četností výskytů okamžitých hodnot účinníku za celé období měření kromě období vypnutí FKZ a pouze za období vypnutí FKZ

Za zmínku stojí okamžitá hodnota činného výkonu (přesněji její 5 sekundový průměr) v čase 17:01:15 hodin, kdy obě, na sobě nezávislé pracující měřicí soupravy, zaznamenaly jeho zápornou – byť nízkou hodnotu (kolem 10 kW). Pokud by bylo možné vycházet z této skutečnosti, pak by se zřejmě jednalo o zachycení okamžiku rekuperace elektrické energie hnacím vozidlem do napájecí sítě, což v té době bylo přípustné (viz poznámka na straně 69). Ve ryze spekulativní rovině lze najít pro tuto domněnku oporu v platném jízdním řádu ČD, podle něhož, pokud byl dodržen, se v době kolem 17. hodiny pohybuje na trati v blízkosti stanice Blansko vlak EC 79 jedoucí z Prahy do Vídně. Tento vlak je standardně tažen lokomotivou Taurus řady 1216.2, mající schopnost rekuperace, a je možné, že pokud tato měla potřebu brzdít a celý její brzdový výkon nebyl na krátký okamžik spotřebován v trakční síti, pak jeho malá část byla navracena zpět do napájecí sítě.

4.3 Shrnutí výsledků měření

PPDS – Příloha 3 předpokládá týdenní měření, v tomto případě bylo měření 25 hodinové. Lze však předpokládat, že i toto měření poskytlo dostatečný obraz o charakteru trakčního odběru a jeho vlivech na napájecí síť. Provoz na železnici se řídí určitými grafikony a lze předpokládat, že ani v dalších dnech týdne není průběh denního zatížení diametrálně odlišný. Během týdenního měření by možná byly zaznamenány vyšší špičkové hodnoty jednotlivých veličin, nicméně v průměru by se patrně „rozplynuly“. Navíc je zřejmé, že naměřené hodnoty se nepohybují na hraně nebo v těsné blízkosti normativních mezí (až na překročení jmenovitého zatížení trakčního transformátoru, ale pokud v běžném provozním schématu pracují oba transformátory, dojde k separaci výkonu), proto je možné počítat s určitou rezervou k jejich dosažení i v případě zvýšení trakčního odběru. Rozdělení trakčního odběru na dva transformátory bude mít také dopad na zmenšení napěťové nesymetrie v přívodním vedení. Přehled o všech vyhodnocovaných veličinách a jejich limitních hodnotách je uveden v tab. 3.

Tab. 3 - Shrnutí výsledků měření

Měřená veličina	Limitní hodnoty dle legislativy		Naměřené hodnoty		Závěr
Napájecí napětí (kV) (10 minutové průměry)	Minimální	99	115,9		Vyhovuje
	Maximální	121	119,4		
Napájecí napětí trolejového vedení (kV) (okamžité hodnoty)	Minimální trvalé	19	24,4		Vyhovuje
	Maximální trvalé	27,5	27,59 po dobu 1,75 minuty		
	Maximální krátkodobé (maximálně 5 minut)	29			
Nesymetrie napětí (%) (10 minutové průměry)	≤ 1,5		0,594		Vyhovuje
THD_U (%) (10 minutové průměry)	≤ 2,5		Fáze „A“	1,13	Vyhovuje
			Fáze „B“	1,46	
			Fáze „C“	1,19	
U_h/U_n (%) (10 minutové průměry)	≤ 2 (pro kterýkoliv řád harmonické)		Fáze „A“ (5. harm.)	0,99	Vyhovuje
			Fáze „B“ (5. harm.)	1,22	
			Fáze „C“ (5. harm.)	0,98	
Účinník cos φ (-)	0,95 až 1 induktivních (měsíční průměr)		Dílčí hodnoty mimo interval, celkově nelze zhodnotit		

Poznámka: je nutné mít na zřeteli, že i v případě překročení limitních hodnot 10 minutových průměrů, existuje zde stále rezerva v podobě přípustného 5% výskytu překročených hodnot za dobu týdenního intervalu a navíc byly hodnoceny výhradně klouzavé průměry, které lze považovat za „přísnější“.

5 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo analyzovat chování trakčního odběru vůči napájecí síti z hlediska účinků nepříznivých vlivů. ČD používají pro napájení elektrické trakce dvě rozdílné napájecí proudové soustavy. Praktická část této diplomové práce analyzuje chování té – z hlediska emise nepříznivých vlivů – komplikovanější a sice střídavé napájecí proudové soustavy 25 kV 50 Hz.

Díky prozíravému kroku dodavatele měření pro tehdejší ČSD v samotných začátcích rozmachu elektrizace tratí stejnosměrným systémem 3 kV, který představoval dvanáctipulzní schéma trakčních usměrňovačů, je i z dnešního pohledu otázka splnění požadavků dodavatele elektrické energie, týkající se jak účinku, tak zkrácení napětí vyššími harmonickými, považována za vyhovující.

Jiná situace je u proudové soustavy 25 kV 50 Hz, jejíž vznik byl mimo jiné podpořen očekávaným jednoduchým schématem – přívodem elektrické energie z veřejné distribuční sítě a následnou transformací na jmenovité napětí trakční sítě. S tím jak se postupně měnily a zpříšňovaly podmínky dodavatele elektrické energie na „čistotu odběru“ elektrické energie vzala původní výhoda střídavé jednofázové trakce za své. Byly zavedeny cenové přírázky placené navíc k ceně elektrické energie za nedodržení požadovaného účinku v induktivní oblasti, později i za dodávku kapacitní jalové energie a od roku 1995 i ustanovení, že *„Odběratel je povinen zajistit, aby jeho odběrné zařízení připojené na rozvodné zařízení dodavatele bylo vybaveno dostupnými technickými prostředky omezujícími vliv zpětného působení na kvalitu dodávané elektřiny ostatním odběratelům a aby neovlivňovalo funkci řídicí, měřicí a zabezpečovací techniky a činnost systému hromadného dálkového ovládní“*.

Je zřejmé, že bylo nutné přistoupit ke komplexnímu řešení problému a realizovat takové zařízení, které by umožňovalo splnit dané požadavky. Začal dlouhodobý proces plný pokusů a omylů vedoucí k instalaci filtračně-kompenzačního zařízení v trakčních napájecích stanicích. Tímto se našlo přijatelné řešení a z hlediska dodavatele elektrické energie byl nalezen uspokojivý stav. To je mimo jiné i parné z výsledků měření uvedených v kapitole 4.

Filtračně-kompenzační zařízení však neřeší samotnou podstatu problému. V poslední době se vlivem dalšího rozvoje silové elektroniky nachází a aplikuje i jiné řešení, kterým je změna koncepce hnacích vozidel. Tím je zaručeno, že nepříznivé vlivy jsou zlikvidovány hned v jejich zdroji – hnacím vozidle. Je pouze otázkou času, kdy hnací vozidla se zastaralou koncepcí trakčního obvodu ukončí své služby a s nimi i tak pracně a dlouhodobě, až do dnešní podoby, vyvíjené filtračně-kompenzační zařízení v trakčních napájecích stanicích.

Seznam použitých zdrojů

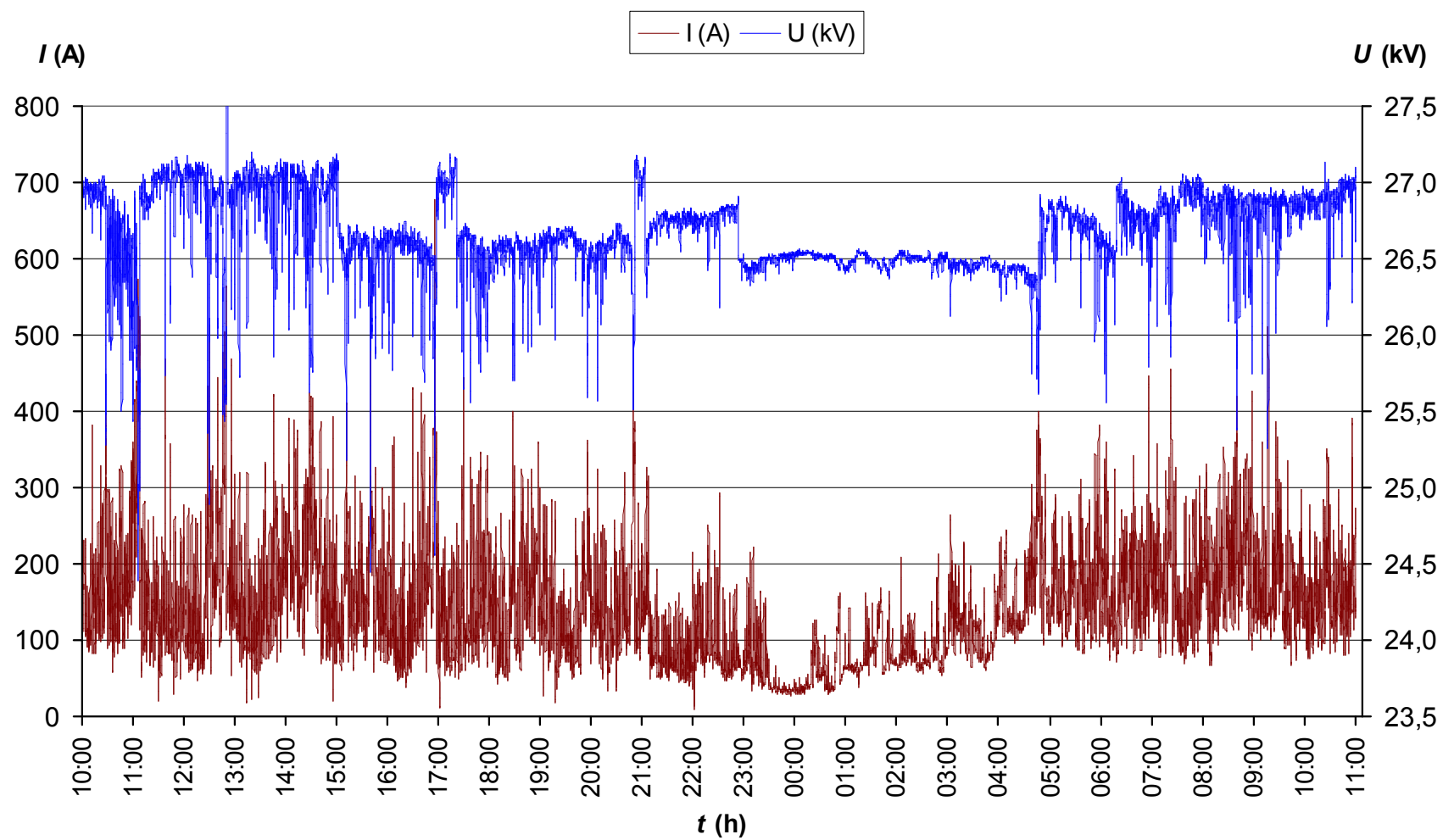
1. MAJ, J.; POHL, J. *Elektrické lokomotivy Siemens ES 64 U4* [online]. [cit. 2010-02-07]. Dostupné z WWW: <http://www.railvolution.net/czechraildays/craildays5/seminare/v_6.pdf>.
2. LANÁKOVÁ, G.; ŠINDLER, D. *Nápajanie elektrických dráh*. 1. vyd. Bratislava : ALFA, 1989, 206 s.
3. ČSN EN 50163 ed. 2. *Drážní zařízení – Napájecí napětí trakčních soustav*. Praha : Český normalizační institut, 2005.
4. HLAVA, K. *Elektromagnetická kompatibilita (EMC) drážních zařízení*. 1. vyd. Univerzita Pardubice, 2004, 124 s. ISBN 80-7194-637-0.
5. MATĚJKA, J. Nová technika při elektrizaci trati Brno – Česká Třebová. In *Vědeckotechnický sborník Českých drah č. 8 (1999)* [online]. [cit. 2009-12-09]. Dostupné z WWW: <<http://www.cdmail.cz/VTs/vts08.html>>.
6. GREGORA, S.; NOVÁK, J. Modernizace trakčních pohonů vozidel elektrické trakce. In *Vědeckotechnický sborník Českých drah č. 17 (2004)* [online]. [cit. 2010-02-20]. Dostupné z WWW: <<http://www.cdmail.cz/VTs/vts17.html>>.
7. PALEČEK, J. *Napájení jednofázové vozby Českých drah z hlediska elektromagnetické kompatibility*. 1. vyd. Ostrava : VŠB – TU, 2000, 98 s. ISBN 80-7078-791-0.
8. MAYER, D. *Elektrodynamika v energetice*. 1. vyd. Praha : BEN – technická literatura, 2005, 278 s. ISBN 80-7300-164-0.
9. Kvalita elektrické energie – průvodce. *Rušení napětí – úvod do nesymetrie* [online]. [cit. 2009-10-07]. Dostupné z WWW: <http://www.medportal.sk/files/file/lpq_cz/5_1_3.pdf>.
10. ČEZ Distribuce, a. s. *Pravidla provozování distribuční soustavy 2009 – Příloha č. 3* [online]. [cit. 2009-10-14]. Dostupné z WWW: < <http://www.cezdistribuce.cz/cs/energeticka-legislativa/pravidla-provozovani-ds/ppds-2009.html> >.
11. JANSÁ, F.; PELEŇSKÝ, Š. *Napájení elektrických drah III*. 1. vyd. Bratislava : ALFA, 1976.
12. HLAVA, K. Důsledky zákona č. 222/1994 Sb. na napájecí soustavu koridorů. In *Vědeckotechnický sborník Českých drah č. 1 (1995)* [online]. [cit. 2009-10-15]. Dostupné z WWW: <<http://www.cdmail.cz/VTs/vts01.html>>.
13. MIKULEC, M.; HAVLÍČEK, V. *Základy teorie elektrických obvodů 1*. 2. vyd. Praha : ČVUT, 2003, 252 s. ISBN 80-01-02519-5.
14. VLČEK, J.; ČASTOVÁ, N. *Funkce komplexní proměnné a integrální transformace*. 1. vyd. Ostrava : VŠB – TU, 2002, 253 s. ISBN 80-7078-161-0.

15. De la ROSA, F. *Harmonics and power systems*. 1. Title. Boca Raton, USA : CRC Press, 2006, 181 s. ISBN 0-8493-3016-5.
16. Kvalita elektrické energie – průvodce: *Harmonické – příčiny a účinky* [online]. [cit. 2009-10-22]. Dostupné z WWW: <http://www.medportal.sk/files/file/3_1%281%29.pdf>.
17. KORENC, V.; HOLOUBEK, J. *Kompensace jalového výkonu v praxi*. 1. vyd. Praha : IN-EL, 1999, 123 s. ISBN 80-86230-07-4.
18. RUSEK, S. *Teoretická elektroenergetika*, Ostrava : VŠB – TU, 1999.
19. RICHTER, A.; KONEČNÁ, E. *Harmonické zkreslení napájecí sítě, jeho definice, měření a praxe* [online]. [cit. 2009-10-27]. Dostupné z WWW: <http://www.mti.tul.cz/files/vke/harmonicke_zkresleni.pdf>.
20. HLAVA, K.; BOČEK, V. Aktivita ČD v oblasti snižování nákladů na energii pro elektrickou trakci. In *Vědeckotechnický sborník Českých drah č. 2 (1996)* [online]. [cit. 2009-10-29]. Dostupné z WWW: <<http://www.cdmail.cz/VTs/vts02.html>>.
21. HLAVA, K. Analýza napěťových harmonických v trakčním vedení železnic ČD. In *Vědeckotechnický sborník Českých drah č. 19 (2005)* [online]. [cit. 2009-11-05]. Dostupné z WWW: <<http://www.cdmail.cz/VTs/vts19.html>>.
22. HLAVA, K.; ČERNÝ, O.; DOLEČEK, R. Přechodné jevy při provozování filtračně kompenzačních zařízení na ČD. In *Vědeckotechnický sborník Českých drah č. 21 (2006)* [online]. [cit. 2009-10-29]. Dostupné z WWW: <<http://www.cdmail.cz/VTs/vts21.html>>. Dostupné z WWW: <<http://www.cdmail.cz/VTs/vts08.html>>.
23. HLAVA, K. Diagnostika vlivu napájecí soustavy jednofázové trakce ČD na signál HDO. In *Vědeckotechnický sborník Českých drah č. 10 (2000)* [online]. [cit. 2009-11-08]. Dostupné z WWW: <<http://www.cdmail.cz/VTs/vts10.html>>.
24. HLAVA, K. Parametry odběru elektrické energie dvanáctipulzní trakčním usměrňovačem v závislosti na jeho zatížení. In *Vědeckotechnický sborník Českých drah č. 14 (2002)* [online]. [cit. 2009-11-09]. Dostupné z WWW: <<http://www.cdmail.cz/VTs/vts14.html>>.
25. HLAVA, K. Důsledky nesymetrie fázových reaktancí obou sekcí transformátoru dvanáctipulzního usměrňovače ČD z hlediska jeho EMC vůči napájecí síti a trakčnímu vedení. In *Vědeckotechnický sborník Českých drah č. 17 (2004)* [online]. [cit. 2009-11-09]. Dostupné z WWW: <<http://www.cdmail.cz/VTs/vts17.html>>.
26. ČEZ Distribuce, a. s. *Pravidla provozování distribuční soustavy 2009* [online]. [cit. 2010-03-14]. Dostupné z WWW: < <http://www.cezdistribuce.cz/cs/energeticka-legislativa/pravidla-provozovani-ds/ppds-2009.html> >.

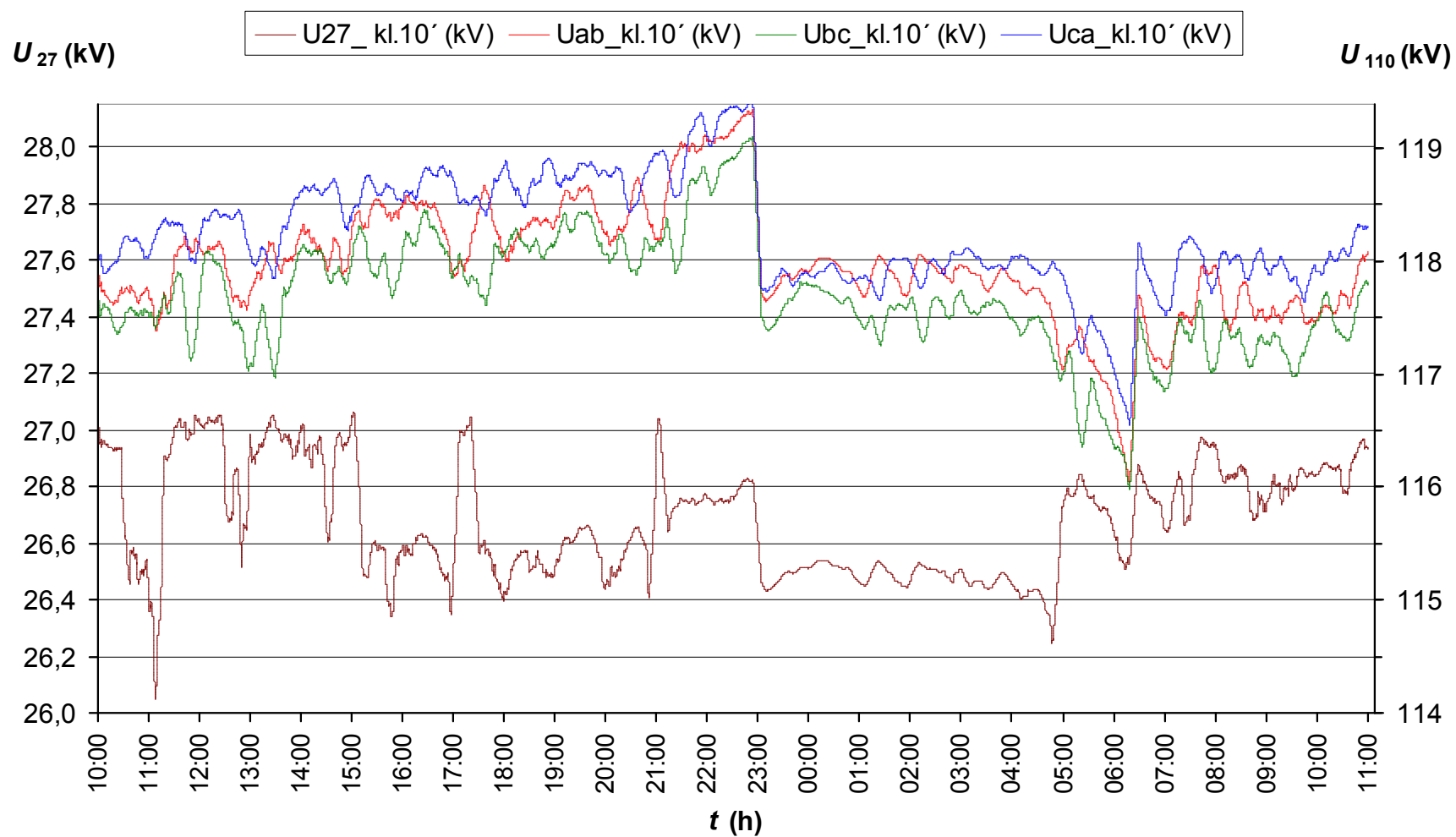
Seznam příloh

- Příloha A Graf: časový průběh okamžitých hodnot napětí a proudu na sekundární straně trakčního transformátoru.
- Příloha B Graf: časový průběh klouzavých 10 minutových průměrů napětí na primární a sekundární straně trakčního transformátoru.
- Příloha C Graf: časový průběh celkového odebíraného výkonu TNS a činitele napěťové nesymetrie. Okamžité hodnoty i klouzavé 10 minutové průměry.
- Příloha D Graf: časový průběh klouzavých 10 minutových průměrů poměrných hodnot harmonických proudů vybraných řádů a celkového harmonického zkreslení proudu na primární straně trakčního transformátoru.
- Příloha E Graf: časový průběh klouzavých 10 minutových průměrů poměrných hodnot harmonických napětí vybraných řádů a celkového harmonického zkreslení napětí ve fázi „B“ přívodního vedení 110 kV.
- Příloha F Obrazová příloha: fotografie z TNS Blansko.

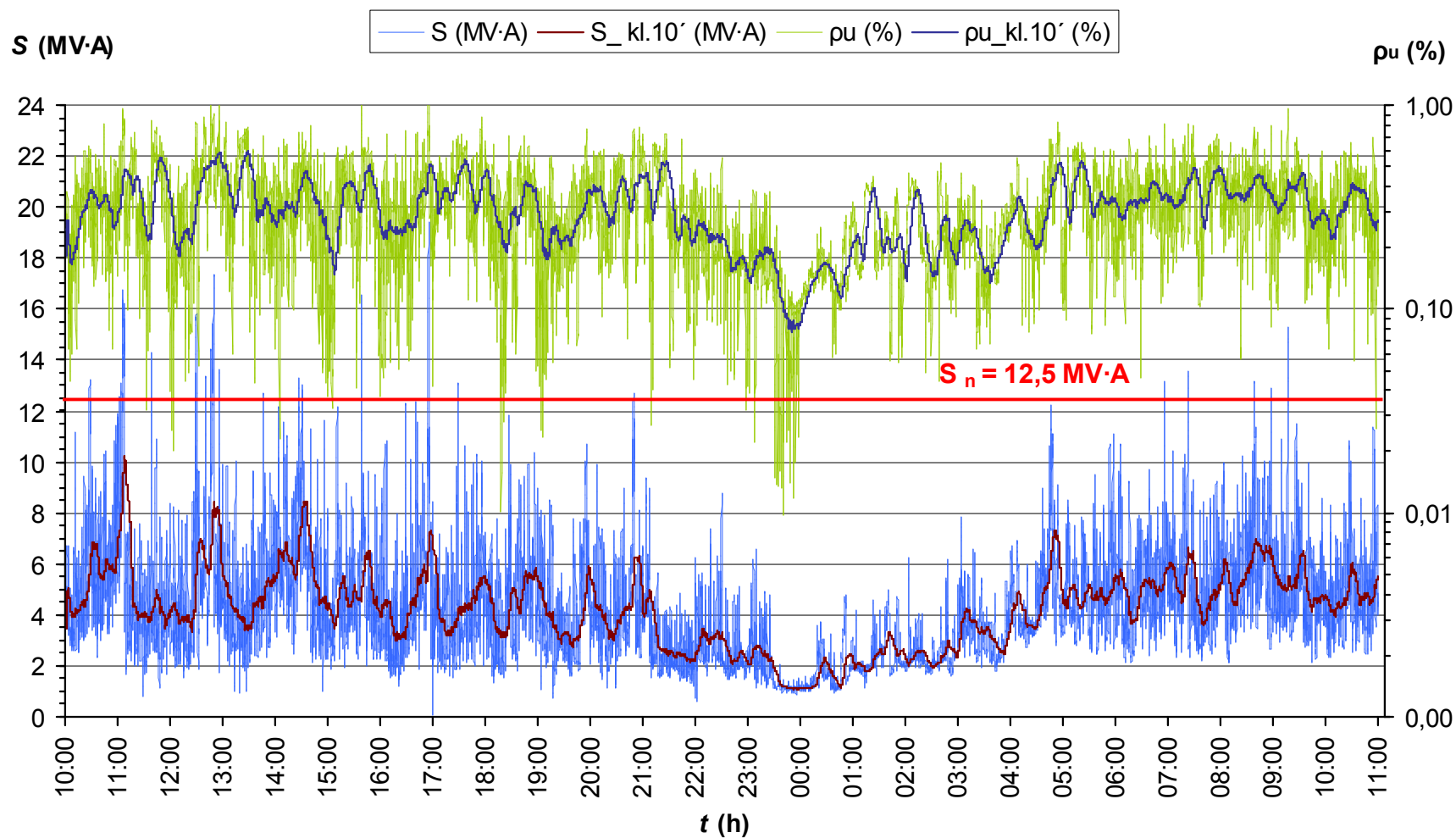
Příloha A: Časový průběh okamžitých hodnot napětí a proudu na sekundární straně trakčního transformátoru. Komentář ke grafu je na straně 75 a 76.



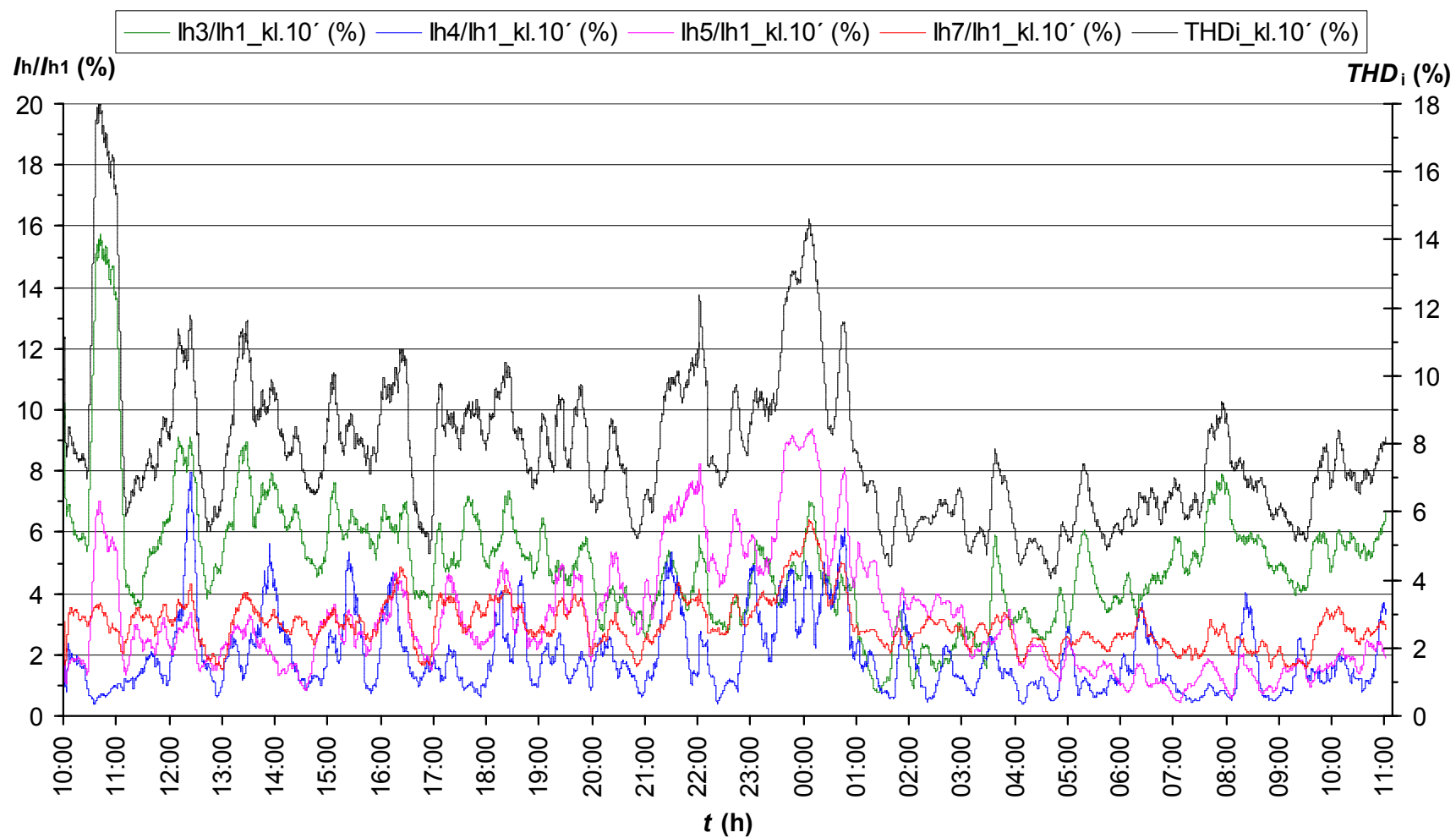
Příloha B: Časový průběh klouzavých 10 minutových průměrů napětí na primární a sekundární straně trakčního transformátoru.



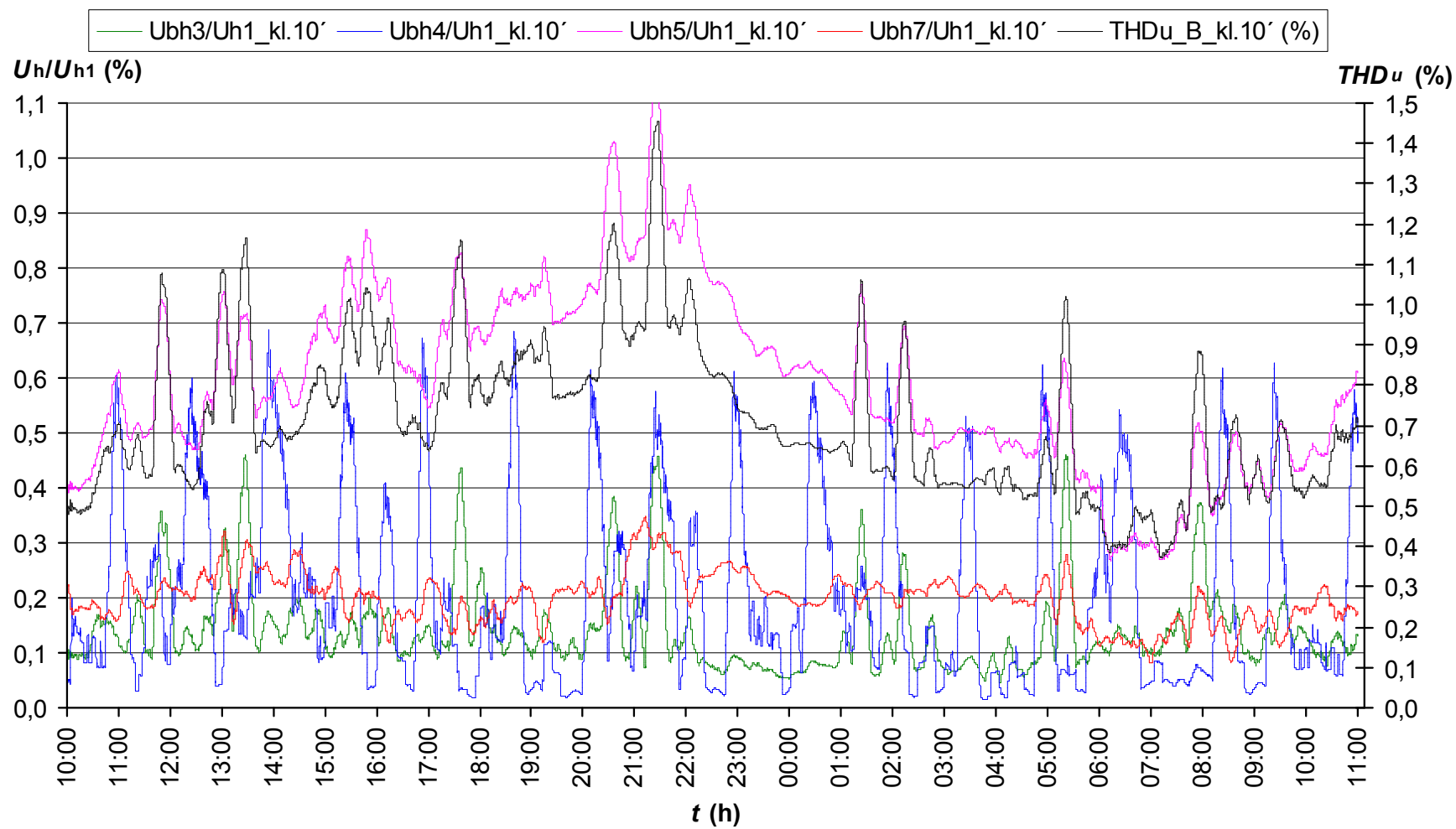
Příloha C: Časový průběh celkového odebíraného výkonu TNS na přívodu linky 110 kV a činitele napěťové nesymetrie. Okamžité hodnoty jsou proloženy klouzavými 10 minutovými průměry. Pro lepší přehlednost časového průběhu je činitel napěťové nesymetrie vynesena v logaritmickém měřítku. Komentář ke grafu je na straně 78.



Příloha D: Časový průběh klouzavých 10 minutových průměrů poměrných hodnot harmonických proudů řádů 3, 4, 5, 7 a celkového harmonického zkreslení proudu na primární straně trakčního transformátoru. Komentář ke grafu je na straně 80.



Příloha E: Časový průběh klouzavých 10 minutových průměrů poměrných hodnot harmonických napětí řádů 3, 4, 5, 7 a celkového harmonického zkreslení napětí ve fázi „B“ přírodního vedení 110 kV. Komentář ke grafu je na straně 80.



Příloha F: Fotografie z TNS Blansko.



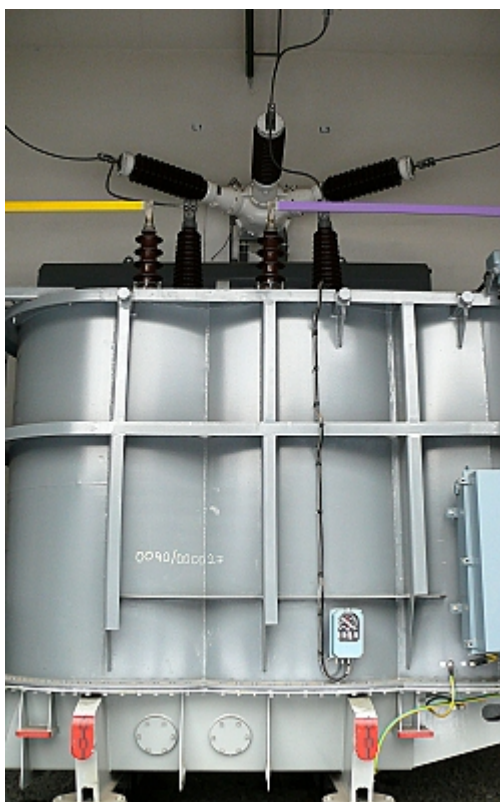
Prívod z linek 110 kV a průchodky SF₆



Připojení měřicí aparatury na straně 110 kV



Zapouzdřená rozvodna 110 kV



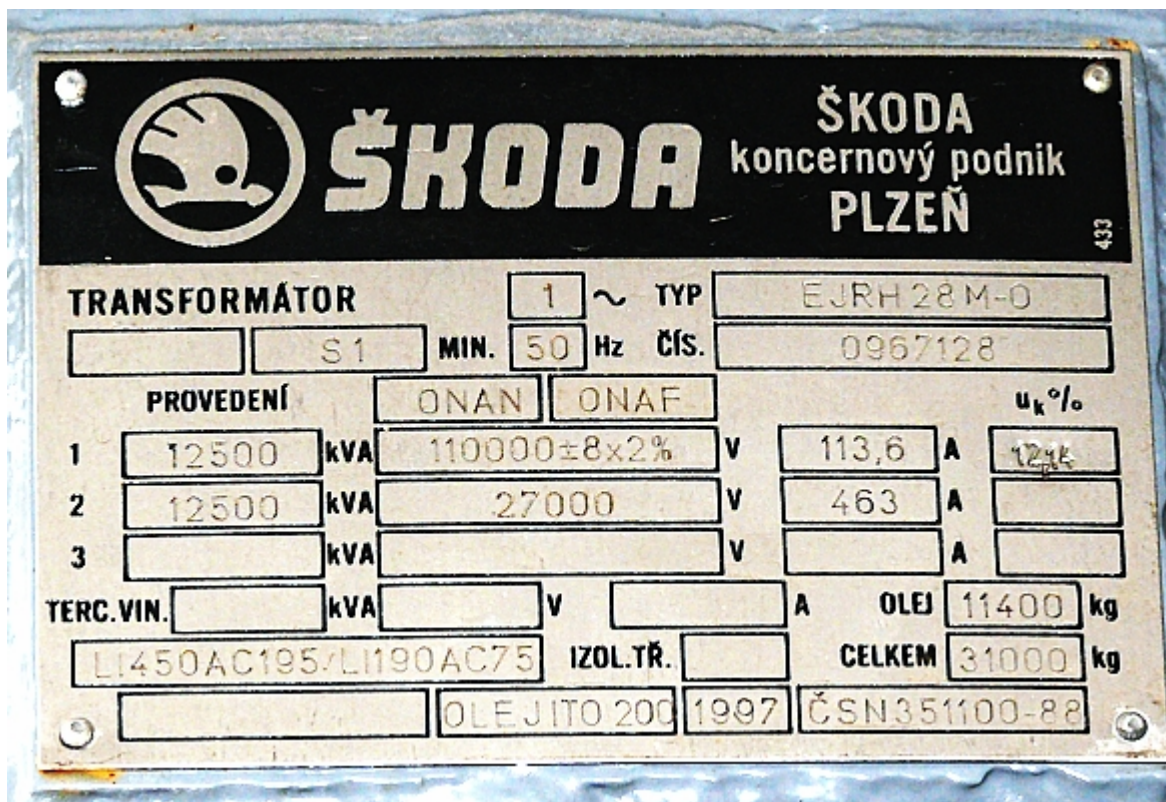
Trakční transformátor 110/27 kV



Přepínač odboček



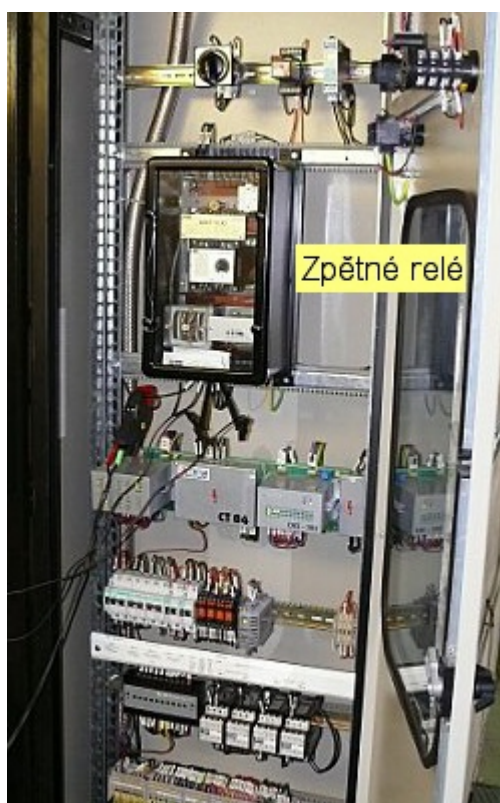
Průvlekový transformátor nádobové (kostrové) ochrany



Typový štítek trakčního transformátoru



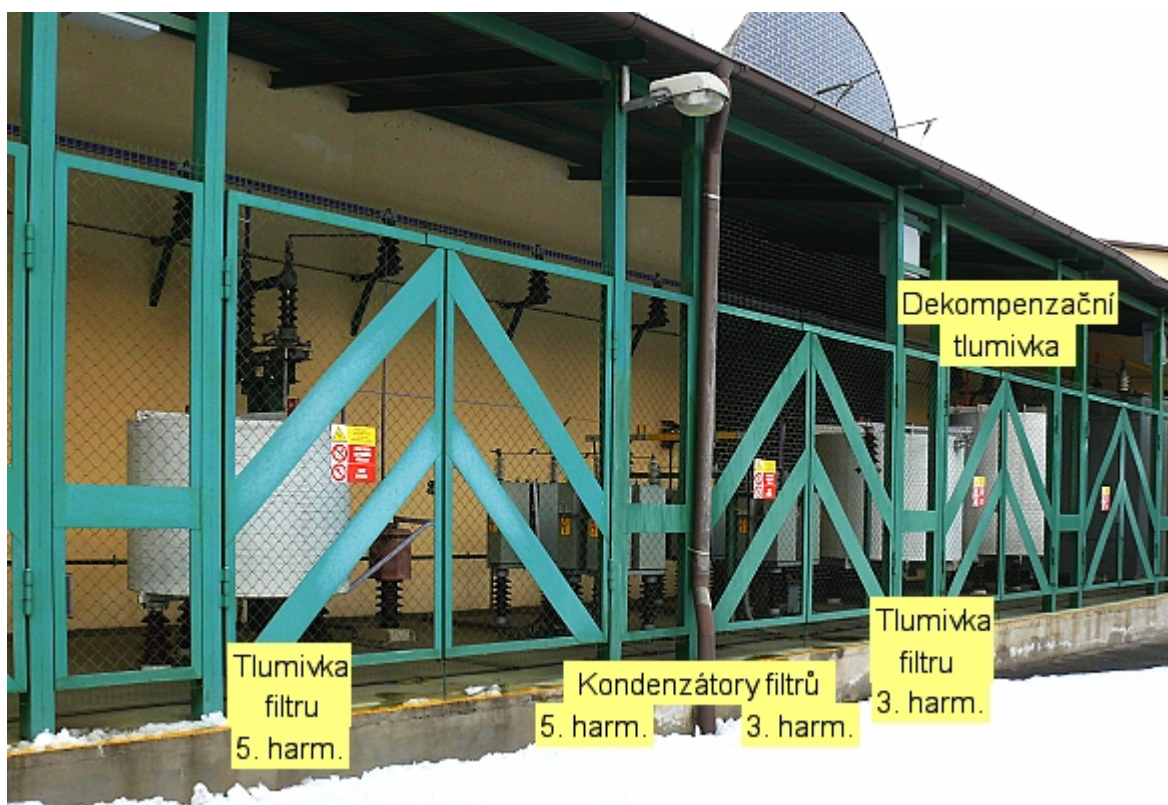
Kobková rozvodna 27 kV



Připojení měřicí aparatury na straně 27 kV



Regulátor dekompenzační tlumivky



Stanoviště filtračně-kompenzačního zařízení



Transformátor dekompenzační větve 27/5 kV



Vyvedení výkonu z TNS do trakčního vedení